

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

EIXOS TUBULARES EM MATERIAL SAE 4130H COM CAMADA CEMENTADA
NA PARTE EXTERNA E INTERNA

Valter Steyer

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2006

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

EIXOS TUBULARES EM MATERIAL SAE 4130H COM CAMADA CEMENTADA
NA PARTE EXTERNA E INTERNA

VÁLTER STEYER
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2006

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly, PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Antonio F. Vilela
Coordenador do PPGEM

Dedico esta dissertação aos meus pais, Jorge e Dalia, à Alethéa e
à GKN do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Afonso Reguly e ao Programa de Pós-Graduação em Eng. Minas, Metalúrgica e de Materiais pelo incentivo e a força que me deram para a realização desta Dissertação de Mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Aumento de Rigidez Torsional	3
2.2 Diminuição de Peso	5
2.3 Vibração – Ruído e Desconforto.....	7
2.4 Tratamento Térmico	10
2.5 Conformação Mecânica por Martelamento	14
2.6 Processo de Conformação do entalhado	18
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	20
3.1 Material SAE 4130H.....	21
3.2 Tratamento Térmico: Ciclo de Cementação e Têmpera	22
3.3 Caracterização Metalúrgica	23
3.3.1 Metalografia	23
3.3.2 Perfil de dureza e ensaio de tração.....	24
3.4 Ensaio Mecânicos.....	26
3.4.1 Fadiga Torsional.....	27
3.4.2 Torção Estática.....	28
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Caracterização Metalúrgica	29
4.1.1 Metalografia	29
4.1.2 Perfil de dureza e ensaio de tração.....	37
4.2 Ensaio Mecânicos.....	40
4.2.1 Fadiga Torsional.....	40

4.2.2	Torção Estática.....	46
5.0	CONCLUSÕES	47
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação esquemática de um semi-eixo homocinético.	3
Figura 2.2	Efeito “Tip in and Back Out” devido a oscilação de torque durante a aceleração do veículo	5
Figura 2.3	Comparativo entre o consumo de combustível (Km/litro) e peso do veículo..	6
Figura 2.4	Comparativo entre eixos de ligação para os aspectos de peso, rigidez torsional e frequência natural.	7
Figura 2.5	Comparativo entre eixos de ligação para os aspectos de peso, rigidez torsional e frequência natural.	9
Figura 2.6	Efeito da Temperatura e Tempo na difusão do carbono.	12
Figura 2.7	Conformação Mecânica : Martelamento sob mandril e martelamento fixo...	14
Figura 2.8	Comparativo entre peça usinada e conformada por martelamento.	16
Figura 2.9	Dobras internas provenientes do processo de martelamento.	17
Figura 2.10	Representação esquemática de prensa hidráulica para conformação do entalhado.	19
Figura 3.1	Fluxograma do desenvolvimento do procedimento experimental.	20
Figura 3.2	Gráfico representativo da temperabilidade do aço SAE 4130H.	21
Figura 3.3	Corpos de Prova preparados para ensaio de dureza Brinell.	24
Figura 3.4	Corpos de Prova preparados para ensaio de dureza Vickers (HV 10).	25
Figura 3.5	Corpos de Prova utilizados para o ensaio de tração.	25
Figura 4.1	Metalografia da amostra A na seção transversal com aumento 200X.	30
Figura 4.2	Metalografia da amostra A na seção longitudinal com aumento 200X.	30
Figura 4.3	Metalografia da amostra B na seção transversal com aumento 200X.....	31
Figura 4.4	Metalografia da amostra B na seção longitudinal com aumento 200X.....	31
Figura 4.5	Metalografia da amostra C na seção transversal com aumento 200X.....	32
Figura 4.6	Metalografia da amostra C na seção longitudinal com aumento 200X.....	32

Figura 4.7	Microestrutura junto à superfície da amostra C - Aumento 2500X.	33
Figura 4.8	Microestrutura próximo à superfície da amostra C – Aumento 2500X.	34
Figura 4.9	Microestrutura no centro da amostra C – Aumento 2500X.	34
Figura 4.10	Trinca de topo em eixo monobloco tubular.	35
Figura 4.11	Microestrutura Martensita Revenida do eixo monobloco tubular - Aumento 400X.	36
Figura 4.12	Microestrutura com Austenita retida do eixo monobloco tubular - Aumento 400X.	36
Figura 4.13	Valores de Dureza HV do eixo monobloco tubular após tratamento térmico demonstrando perfil em “U”.	40
Figura 4.14	Gráfico do teste de fadiga torsional para eixo monobloco tubular.	41
Figura 4.15	Modo de falha característico em fadiga para eixo monobloco tubular.	43
Figura 4.16	Modo de falha característico em fadiga para eixo monobloco tubular.	43
Figura 4.17	Início de falha no lado externo da peça.	44
Figura 4.18	Gráfico do teste de torção estática.	45
Figura 4.19	Componente testado em torção estática.	46
Figura 4.20	Componente testado em torção estática.	46
Figura 6.1	Eixo monobloco não temperado na região central – problema “twist”	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição química usual do aço SAE 4130H (% em peso)	21
Tabela 3.2	Composição química das amostras A,B e C do aço SAE 4130H	22
Tabela 4.1	Valores de Dureza Brinell para as amostras A, B e C.....	38
Tabela 4.2	Valores de Dureza Vickers para as amostras A,B e C	38
Tabela 4.3	Resultados dos ensaios de tração para as amostras A,B e C	39
Tabela 4.4	Resultados dos ensaios de fadiga torsional para a amostra B	42
Tabela 4.5	Resultados dos ensaios de torção estática para a amostra B	45

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a aplicação de um eixo conector para semi-eixos homocinéticos, demonstrando as vantagens da aplicação do eixo monobloco tubular com camada cementada na parte externa e interna em relação a geometria tradicional , eixo maciço temperado por indução.

As principais etapas de fabricação do eixo monobloco tubular, tais como, conformação por martelamento e conformação do entalhado serão apresentados e discutidos a sua viabilidade econômica.

A matéria prima utilizada para fabricar o eixo monobloco tubular é tubo sem costura SAE 4130H, que será discutido principalmente com relação ao seu estado de fornecimento.

No tratamento térmico de cementação e têmpera será verificado os parâmetros de controle de processo para atingir os valores especificados de dureza superficial, profundidade de camada e microestrutura.

Por fim, será revisado os ensaios mecânicos de fadiga e torção estática para homologação do eixo monobloco tubular. Neste ponto será dada ênfase na origem da fratura e a forma da mesma.

ABSTRACT

This work has the proposal to evaluate the application of interconnecting shaft for drive shaft system, showing the vantages of using the Monobloc Tubular Shaft (MTS) case carburized in internal and external diameter related to traditional geometry, such as bar shaft induction hardened.

The process of Monobloc Tubular Shaft manufacturing, such as, swaging and spline drawing operations, will be detailed and the economically viable will be discussed.

The raw material seamless tube SAE 4130H for the Monobloc Tubular Shaft will be discussed specially related to the metallurgical supplier condition.

At the heat treatment, case carburizing and hardening, will be checked the parameters of process control in order to achieve the specification of surface hardness, case depth and microstructure.

At last, it will present the mechanical tests, such as torsional fatigue and static torsion, to homologue the Monobloc Tubular Shaft. At this point the emphasis will be for fracture analysis.

1.0 INTRODUÇÃO

O eixo interconector é um elemento básico em um conjunto semi-eixo homocinético. Geralmente é manufaturado a partir de uma barra maciça ou ponteiras sólidas ligadas a um tubo por solda à fricção.

Um avanço deste conceito foi realizado com o desenvolvimento do eixo monobloco tubular em material SAE 4130H com camada cementada na parte externa e interna. Este eixo pode ser manufaturado através da combinação de modernas técnicas de conformação por martelamento, conformação entalhado por extrusão inversa e tratamento térmico de cementação e têmpera. Para o processo de conformação por martelamento é de suma importância que a matéria prima possua a maior ductilidade possível.

Em comparação com demais eixos, o eixo monobloco tubular é significativamente mais leve. O fato de apresentar peso menor que os demais eixos de ligação é relevante, uma vez que a indústria automobilística está constantemente buscando componentes mais leves para diminuir o consumo de combustível do veículo.

Com o eixo monobloco tubular consegue-se uma otimização de rigidez torsional devido a possibilidade de aumento de momento de inércia em função da utilização de maiores diâmetros.

Ainda com o eixo monobloco tubular consegue-se uma elevada frequência natural em função da possibilidade de aumento do momento de inércia e diminuição do peso. Desta forma, o eixo monobloco tubular possibilita a redução de ruído e/ou vibração.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O eixo monobloco tubular foi desenvolvido para a indústria automotiva, fazendo parte do conjunto semi-eixo homocinético. Sua função primária é a transmissão de torque entre as juntas homocinéticas devendo ter, portanto, elevada rigidez torsional. O mesmo possui ranhuras/entalhes e rasgos para a fixação das juntas homocinéticas. Como umas das funções secundárias, o mesmo não deve interferir ou ter contato com os demais componentes do veículo, ou seja, o eixo monobloco tubular deve ter perfil externo adequado para o conjunto motor, caixa de câmbio, sistema de exaustão e suspensão. As demais características como minimização de peso e vibração serão vistos nas seções a seguir.

Os semi-eixos homocinéticos são compostos por duas juntas homocinéticas, duas sanfonas (também chamadas de mangas ou coifas) e um eixo interconector, e sua configuração depende do tipo de aplicação. Os veículos possuem um semi-eixo para cada roda motriz.

Para os veículos com tração dianteira, encontramos uma junta fixa no lado da roda e uma deslizante no lado da transmissão, enquanto que para veículos com tração traseira e suspensão independente as duas juntas são deslizantes. Os eixos de interconexão, para ambos os casos, podem ser maciços, tubulares soldados ou monobloco tubular. Para referência, os eixos maciços e tubulares soldados são normalmente produzidos com material SAE1045 ou SAE1050 e temperados por indução. Ainda salienta-se, que para o eixo tubular soldado, se utiliza tubo sem costura, processo de solda à fricção e têmpera por indução somente nas ponteiros maciças das extremidades.

Na figura 2.1, pode se observar um exemplo de semi-eixo com eixo interconector monobloco tubular.

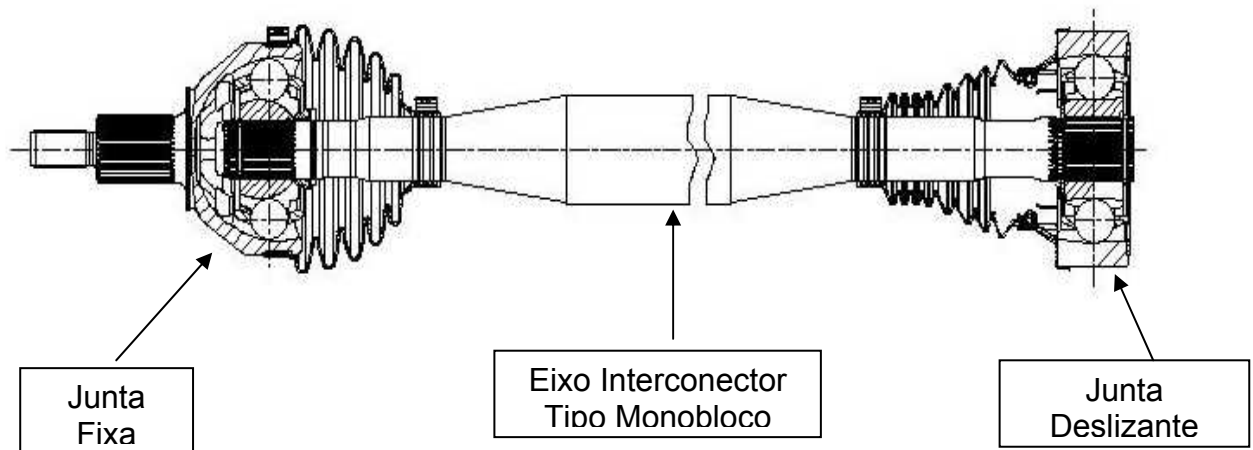


Figura 2.1 Representação esquemática de um Semi-Eixo Homocinético, onde são apresentados a junta fixa, eixo interconector e a junta deslizante. ^(GKN do Brasil)

Uma das funções secundárias do semi-eixo homocinético é não interferir ou ter contato com demais componentes do veículo. Portanto, o perfil externo do eixo monobloco tubular deve ser adequado ao conjunto motor, caixa de câmbio, sistema de exaustão e suspensão. Sendo que dentro desta geometria / perfil, o eixo monobloco tubular deve ser projetado para atender os seguintes requisitos conforme necessidade de aplicação:

- Elevada Rigidez Torsional
- Menor peso possível
- Evitar problemas de vibração e ruído.

2.1 Aumento da Rigidez Torsional

Devido a possibilidade de se utilizar diâmetros maiores nos eixos monobloco tubular, obtêm-se maiores valores de Momento de Inércia, uma vez que este é ditado pela geometria da peça. Através das equações [1] e [2], verifica-se que a tensão de cisalhamento e o ângulo de torção são inversamente proporcionais ao Momento de Inércia. Portanto, mantendo-se o mesmo nível de torque e comprimento da peça, a tensão de cisalhamento e o ângulo de torque serão menores, quanto maior for o Momento de Inércia da peça (PROVENZA, 1990)

$$\text{Tensão de Cisalhamento} = \frac{\text{Torque} * \text{Comprimento}}{\text{Momento de Inércia}} \quad [1]$$

$$\text{Ângulo de Torção} = \frac{\text{Torque} * \text{Comprimento}}{\text{Módulo Transversal} * \text{Momento de Inércia}} \quad [2]$$

$$\text{Momento de Inércia Polar para tubos} = \pi/32 [D^4 - d^4] \quad [3]$$

$$\text{Momento de Inércia Polar para barras} = \pi/32 (D^4) \quad [4]$$

Uma vez que a Rigidez Torsional é uma relação de Torque por ângulo de torção, a mesma apresenta valores maiores para o eixo monobloco tubular com 46mm de diâmetro externo e 41mm diâmetro interno quando comparado com o eixo barra com 27mm de diâmetro. Utilizando as equações [3] e [4] com o diâmetro de 27mm para o eixo barra e diâmetro externo de 46mm e interno de 41mm para o eixo monobloco tubular tem-se um aumento de rigidez torsional para o eixo monobloco de, aproximadamente, 310 %.

Na aplicação em veículos, com o eixo monobloco tubular consegue-se diminuir o efeito “Tip in Back Out”, que consiste na oscilação de torque durante o início da aceleração do veículo. A Figura 2.2 apresenta comparação do efeito “Tip in Back Out” entre um eixo barra de diâmetro 27mm e um eixo monobloco tubular, neste caso com diâmetro externo de 36mm. Nos primeiros 4 segundos de aceleração do veículo a oscilação em amplitude e frequência do torque é maior no eixo barra. Isto significa que o eixo barra de 27mm de diâmetro tem menor rigidez torsional e, por consequência, absorve uma quantidade maior de energia quando comparado com o eixo monobloco tubular com diâmetro de 36mm. Esta maior absorção de energia se dissipa em forma de vibração, gerando, assim, desconforto para o condutor do veículo. A Figura 2.4 também apresenta a comparação entre a Rigidez Torsional de eixo barra com relação ao eixo monobloco tubular.

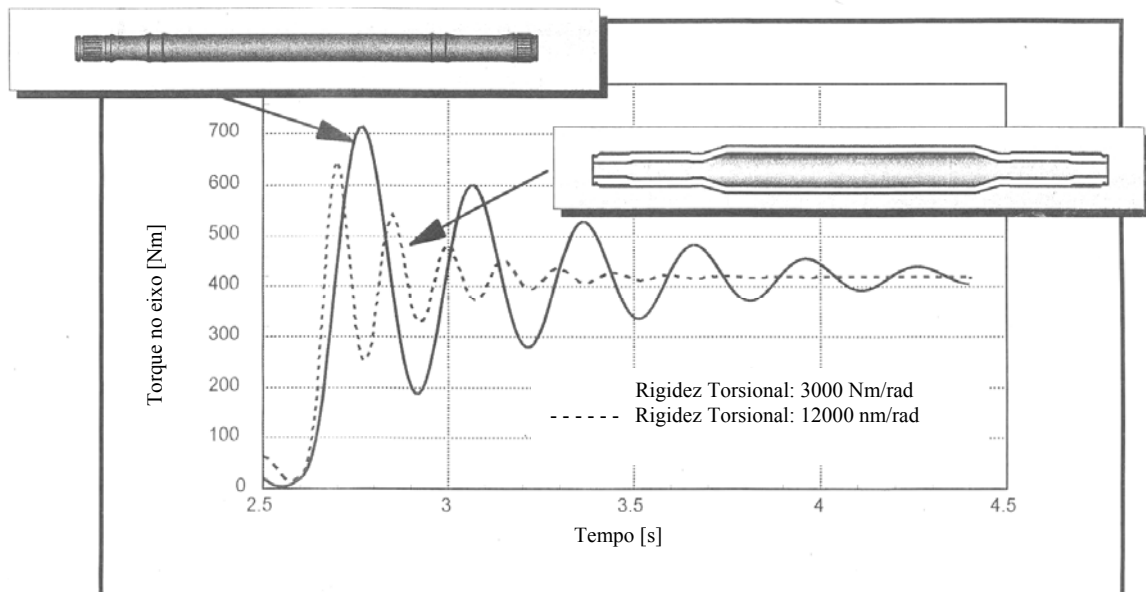


Figura 2.2 Efeito conhecido como “Tip in Back Out” devido a oscilação de torque durante a aceleração do veículo. A figura apresenta uma comparação entre um eixo barra ϕ 27mm (rigidez torsional de 3000Nm) e um eixo monobloco tubular com ϕ externo 36mm (rigidez torsional de 12000Nm) ^(GKN Alemanha)

2.2 Diminuição do Peso

Sob o ponto de vista de redução de consumo de energia e poluição ambiental, a diminuição do peso em componentes automotivos vem se tornando uma exigência cada vez maior. A redução da emissão de gases poluentes para o meio ambiente é um compromisso assumido pela indústria automotiva. Desta forma, a redução de peso em componentes automotivos tem uma contribuição direta nesta tarefa ^(SENUMA, 2001). A figura 2.3 apresenta a relação entre o consumo de combustível (Km/litro) e o peso do veículo.

No caso do semi-eixo homocinético, a importância da redução do peso possui ainda maior relevância por ser um componente dinâmico, onde toda sua massa ou inércia deve girar para movimentar as rodas do veículo.

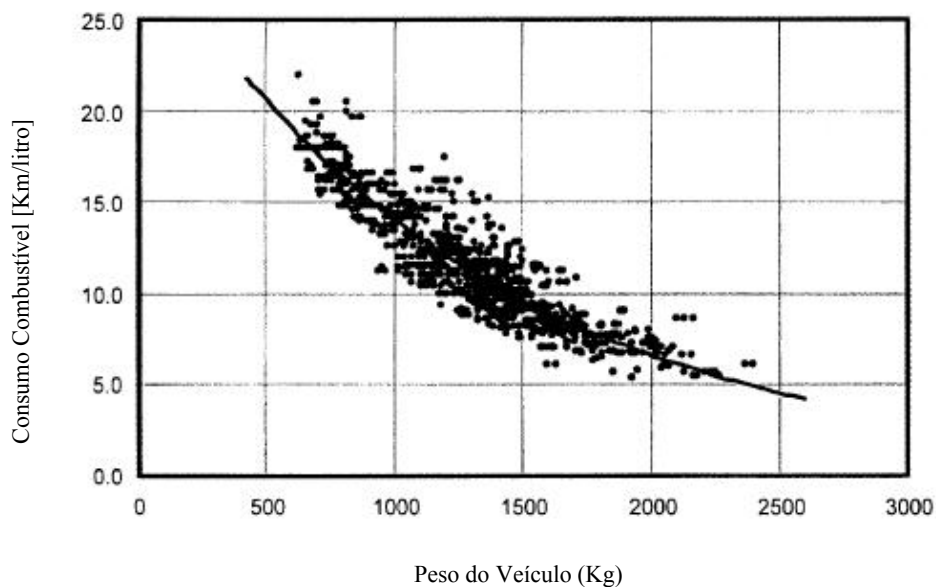


Figura 2.3 Comparação entre consumo de combustível (Km/litro) e peso do veículo. A diminuição de peso do veículo tem contribuição direta na diminuição de consumo de combustível. ^(FUKIZAWA, 2000)

Com a aplicação do eixo monobloco tubular pode-se reduzir o peso de um semi-eixo homocinético em, aproximadamente, 15 a 20%. Esta redução representa uma ordem de 0,6 à 1,0 quilograma de redução por semi-eixo. Realizando a comparação do eixo monobloco tubular com o eixo maciço, tem-se uma redução de peso de até 40%. A figura 2.4 apresenta uma comparação entre eixos de ligação para os aspectos de peso, rigidez torsional e frequência natural, este último até então não abordado. O eixo maciço é a referência. Observa-se que o eixo monobloco tubular é fabricado para cada necessidade de aplicação no veículo. Por exemplo: Eixo monobloco tubular projetado para ter alta rigidez (60% maior em relação ao eixo maciço) também adquire uma melhoria em redução de peso (20% menor em relação ao eixo maciço) e aumento na frequência natural (40% maior em relação ao eixo maciço). O eixo monobloco tubular projetado para ter alta frequência (60% maior em relação ao eixo maciço) também permite uma melhoria em redução de peso (20% menor) e em rigidez torsional (40% maior) com relação ao eixo maciço. No entanto, nem em todos os casos ocorrem melhorias em todas as propriedades. Por exemplo: Eixo monobloco tubular projetado para ter alta redução em peso (55% maior em relação ao eixo maciço) adquire um rigidez torsional menor (20% menor) com relação ao eixo maciço de referência.

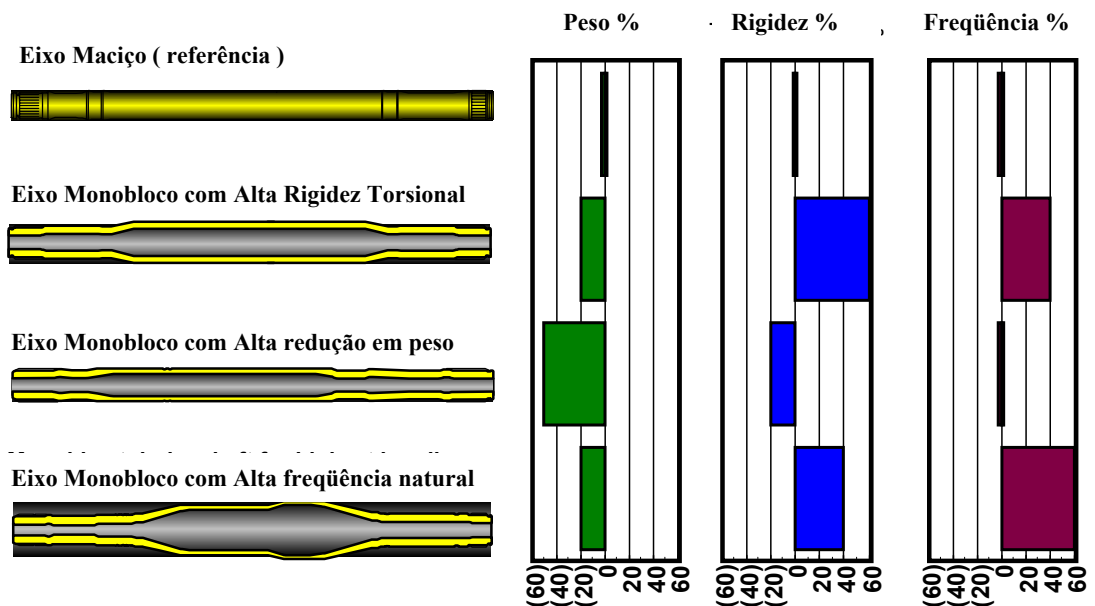


Figura 2.4 Comparação entre eixos de ligação nos aspectos de peso, rigidez torsional e freqüência natural, este último até então não abordado. O eixo maciço é a referência. Destaca-se que o eixo monobloco tubular é fabricado para cada necessidade de aplicação no veículo. (GKN Alemanha)

2.3 Vibração – Ruído e Desconforto

Uma vez que o semi-eixo homocinético realiza a ligação entre a caixa de câmbio e o cubo de roda e estes são componentes que transmitem o torque do motor para as rodas, os mesmos estão envolvidos na percepção de conforto do veículo. Tecnicamente este fenômeno é chamado na língua inglesa de “Noise Vibration- Harshness” (NVH) (GENWAY,1996).

Um motor funciona com variações de rotação em função de sua própria aceleração. Nesta variação de rotação, o motor excita os componentes de transmissão em diferentes freqüências. Uma vez que cada componente possui uma freqüência natural de vibração e caso a mesma seja igual a de excitação do motor, temos o chamado fenômeno de ressonância. Sendo que quando um semi-eixo é excitado na sua freqüência natural ou de ressonância, o mesmo amplia a vibração, podendo gerar ruído, desconforto e carregamentos adicionais no semi-eixo e nas contra peças, como flange do câmbio e cubo da roda, podendo reduzir o desempenho em fadiga. Para evitar este problema de NVH busca-se que a freqüência natural do semi-eixo esteja fora da faixa de excitação do motor.

A figura 2.5 apresenta diferentes configurações de eixos interconectores e suas respectivas frequências naturais. O eixo maciço (item A) é a referência. Para este mesmo eixo maciço com a adição de um desintonizador (item B) é possível obter-se uma frequência natural mais baixa. No entanto, tem-se um incremento considerável em peso, uma vez que um desintonizador é normalmente fabricado com ferro fundido. Ainda considerando o mesmo eixo maciço com a adição de um absorvedor de vibração (item C) é possível modificar o pico de amplitude da frequência natural em dois picos menores. Neste caso também ocorre um incremento de peso, uma vez que o absorvedor de vibração é normalmente composto por aço e borracha. Para os eixos tubulares soldados (item D) e eixo monobloco tubular (item E) consegue-se valores de frequência natural mais elevados, que geralmente se encontram fora da faixa de excitação do motor. Para estes eixos consegue-se valores de rigidez torsional elevados devido à utilização de diâmetros maiores. Já comparando o eixo tubular soldado (item D) com relação o eixo monobloco (item E), este último se apresenta a vantagem de redução de peso.

Visando resolver os problemas de NVH, eixos tubulares são utilizados para aumentar a frequência natural e a rigidez torsional. Normalmente são empregados tubos com ponteiros soldadas por fricção. A espessura de parede do tubo no estado de fornecimento é determinada pela capacidade de torque, sendo que em alguns casos devido a este fator tem-se aumento de peso. O espaço livre disponível na suspensão do veículo é um limitante à aplicação de eixos tubulares. Também são largamente utilizados eixos maciços com absorvedores de vibração ou desintonizadores, como apresentado na figura 2.5, itens B e C.

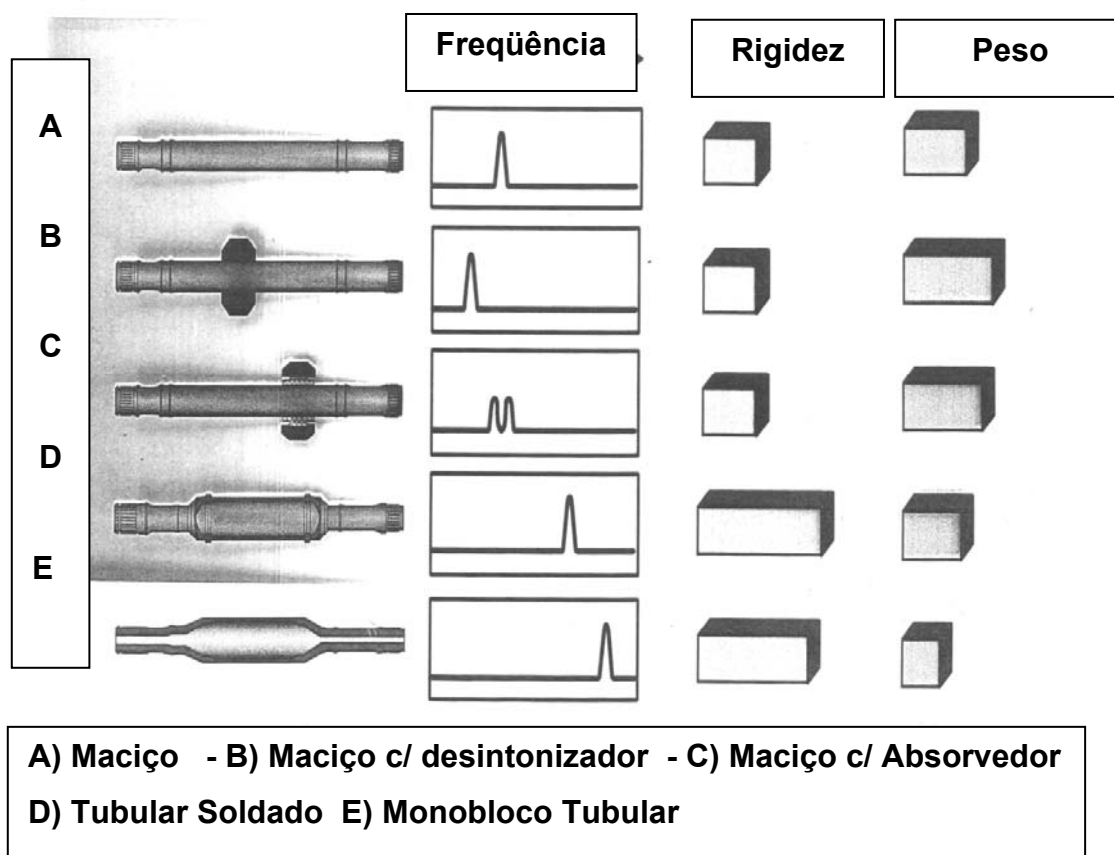


Figura 2.5 Comparação entre eixos de ligação nos aspectos de peso, rigidez torsional e frequência natural. Observa-se que pode ser utilizado absorvedores de vibração (item C) e desintonizadores (item B) em eixos maciços para se modificar a frequência natural do conjunto. Nestes casos sempre ocorre um aumento de peso. Os eixos tubulares soldados (item D) e monobloco tubular (item E) são os que apresentam valores maiores de frequência natural e rigidez torsional e os menores valores de peso. ^(GKN Alemanha)

No caso do eixo monobloco tubular é possível ter frequência natural elevada quando se utiliza o diâmetro externo maior possível em conjunto com espessura de parede mínima possível. Aliado a esta alta frequência natural, o eixo monobloco tubular possibilita uma redução de peso quando comparado com um eixo maciço com absorvedor de vibração ou eixo tubular soldado por fricção.

Ainda cabe salientar as grandezas relacionadas com a frequência de vibração de um corpo ou componente, conforme descritas abaixo ^(GENWAY, 1996) . :

$$Frequência \propto \sqrt{\frac{Módulo \ de \ Elasticidade \ * \ Momento \ de \ Inércia}{Massa \ * \ Comprimento}}$$

2.4 Tratamento Térmico

O eixo monobloco tubular pode ser submetido geralmente a dois tipos de tratamentos térmicos: Cementação, seguido de têmpera ou Têmpera por Indução. Neste trabalho o eixo foi submetido ao processo de cementação gasosa, seguido de têmpera em óleo e revenimento.

Cementação

Através deste tratamento termo-químico, o endurecimento do aço ocorre pela modificação parcial de sua composição química.

A aplicação de calor em um meio apropriado pode levar a essa alteração da composição química do aço até uma profundidade que depende da temperatura de aquecimento e do tempo de permanência à temperatura de tratamento em contato com o meio em questão ^(CHIAVERINI, 1990). A modificação parcial da composição química, seguida geralmente da têmpera, produz também uma alteração na microestrutura do material, resultando em uma modificação das propriedades mecânicas.

O objetivo principal é aumentar a dureza e a resistência ao desgaste superficial, ao mesmo tempo que o núcleo do material permanece dúctil e tenaz.

Essa possibilidade de se aliar uma superfície de alta dureza a um núcleo de menor resistência e maior tenacidade é de grande importância em inúmeras aplicações. O emprego de aços com elementos de liga permite a obtenção de um núcleo com elevada resistência e tenacidade, com superfície extremamente dura, resultando num material capaz de suportar um alto nível de tensões aplicadas.

A cementação é um processo termicamente ativado onde o carbono é introduzido por difusão. Para ocorrer a introdução de carbono na superfície do aço é necessário que o mesmo seja aquecido em um meio rico em carbono a uma temperatura em que o mesmo apresente maior solubilidade no aço.

Os processos usuais de cementação devem elevar o teor superficial de carbono até 0,8% ou 1,0% (KRAUSS, 1995). Fundamentalmente, a cementação é um fenômeno de difusão, isto é, relativo ao movimento de carbono através da estrutura cristalina do aço, onde a força motriz é a diferença de concentração de carbono do meio ou atmosfera com relação ao aço. Portanto, a velocidade de enriquecimento superficial de carbono nos aços depende, em primeiro lugar, do seu coeficiente de difusão. Entretanto, a cementação depende também da fonte de suprimento de carbono e transferência deste para a superfície dos aços. Assim sendo, pode-se estabelecer que os fatores que influem sobre a velocidade de enriquecimento de carbono na superfície dos aços são os seguintes (HARRIS, 1948): teor inicial de carbono no aço; coeficiente de difusão do carbono no aço; temperatura; concentração de carbono na austenita; natureza do agente carbonetante ou do gás de carbonetação e velocidade de fluxo de gás.

Cabe salientar que a cementação é descrita conforme a 2ª Lei de Fick, conforme equação abaixo, sendo uma difusão não estacionária, pois a concentração (C) varia com o tempo (t) em qualquer ponto abaixo da superfície (x) conforme progride a difusão.

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D \frac{dC_x}{dx} \right)$$

O efeito da temperatura e do tempo de tratamento sobre a profundidade da camada pode ser observado na figura 2.6. Por exemplo, para uma profundidade de camada cementada de 1mm necessitamos pouco mais de 2 horas de tratamento a 950°C. Já para uma temperatura de 850°C este tempo seria de, aproximadamente, 9 horas de tratamento. Este efeito da temperatura no coeficiente de difusão dos sólidos é descrita pela Equação de Arrhenius, conforme apresentado abaixo na forma logarítmica, sendo: D o coeficiente de difusão, D₀ a constante de proporcionalidade independente da temperatura, Q a energia de ativação para a difusão, R a constante dos gases ideais e T a temperatura.

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{RT}$$

A profundidade de cementação depende da temperatura e do tempo de tratamento, sendo rápida a princípio, decrescendo depois, o que pode ser comprovado pelo exame das curvas da figura 2.6 (BULLENS, 1938).

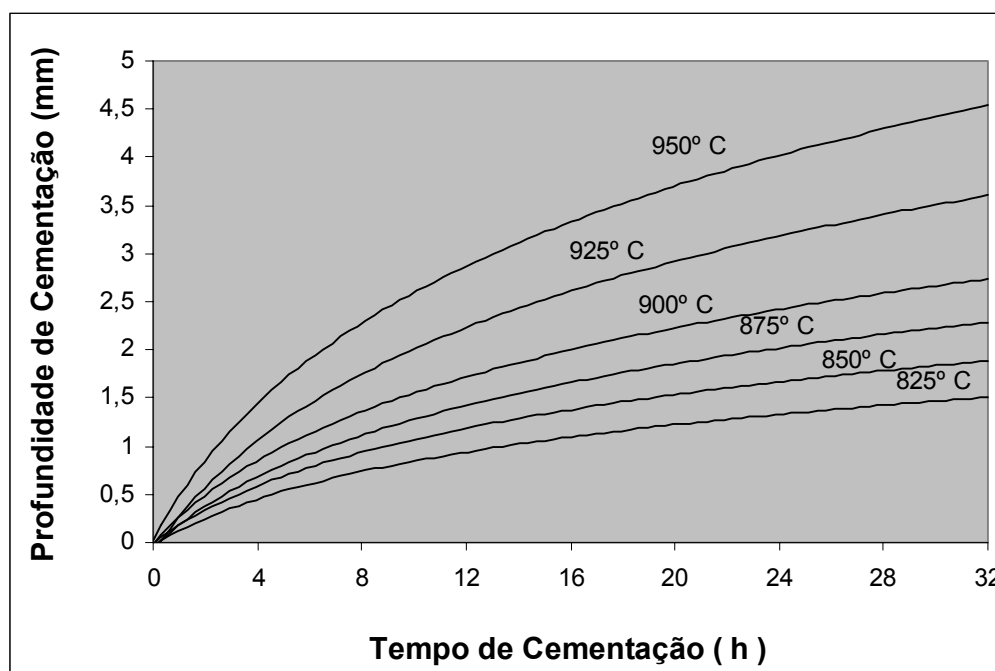


Figura 2.6 A difusão do carbono ou a profundidade de cementação está diretamente ligada com a temperatura e o tempo do tratamento.

A cementação gasosa ainda se apresenta as seguintes vantagens com relação a cementação sólida: o gás é protetor; apresenta maior velocidade de penetração do carbono; a camada cementada apresenta uma espessura e teor de carbono uniformes; as deformações no material são reduzidas, eliminando-se frequentemente a operação de retificação e possibilita têmpera direta, sem reaquecimento após a cementação.

Em função do tratamento térmico de cementação e têmpera, consegue-se aumentar a resistência mecânica do componente através da mudança de microestrutura do material. Devido a estas mudanças que envolvem variações volumétricas e variações na taxa de resfriamento entre superfície e núcleo da peça, surgem tensões residuais compressivas na superfície (HIRSCH, 1999).

O eixo monobloco tubular por possuir geometria favorável (tubo com paredes delgadas) à equalização da temperatura entre superfície e núcleo, aliado à têmpera realizada em óleo (severidade branda) e aos elementos de liga do SAE 4130H que deslocam a curva TTT (Transformação-Tempo-Temperatura) para a direita, consegue-se em temperatura ambiente tensões de compressão na superfície e tensões de tração no núcleo. As tensões de compressão na superfície são benéficas em geral, e também para os

eixos monobloco tubulares, uma vez que inibem a nucleação de trincas durante os carregamentos de fadiga torsional.

Fatiga em Fadiga torsional

A fratura por fadiga resulta do desenvolvimento progressivo de uma trinca sob a influência de tensões aplicadas repetidas vezes (CETLIN, 1988).

Quando o componente é submetido a valores de tensão inferiores ao limite de escoamento, tem-se um grande número de ciclos até a fratura. Este tipo de fadiga é conhecida como Fadiga de Alto Ciclo. Para tensões acima do limite de escoamento, a fratura ocorre com um número menor de ciclos, sendo conhecida como Fadiga de Baixo Ciclo.

No caso do semi-eixos homocinéticos, a utilização de lubrificante (exemplo graxa) no entalhado do eixo tem ajudado a melhorar a vida do componente em fadiga.

A importância do estudo da fadiga torna-se clara quando se considera que todo o componente móvel ou quando parte de uma estrutura estática está submetido a ciclos de tensões. Como efeito a maioria das falhas que ocorrem em serviço são devido à fadiga (CETLIN, 1988).

Costuma-se dividir o processo de fadiga em três estágios:

Estágio I : Corresponde à nucleação da trinca por deformação plástica localizada e o seu crescimento inicial, ao longo de planos de escorregamento, sob a influência de tensões de cisalhamento. Este estágio não é visível a olho nu na superfície da fratura pois, normalmente, não se estende por mais de 2 a 5 grãos. Pode corresponder de 0% a 90% do número total de ciclos que o componente suporta antes de fraturar. A presença de entalhes e altas tensões localizadas reduz a duração deste estágio (BATRA, 2004).

Estágio II : Corresponde ao crescimento da trinca num plano perpendicular à direção da tensão principal de tração.

Estágio III : Corresponde à fratura brusca final que ocorre no último ciclo de tensões quando a trinca desenvolvida progressivamente atinge o tamanho crítico para propagação instável. Desta forma a área da fratura desenvolvida progressivamente depende das tensões aplicadas e da tenacidade do material.

Outro fator importante é o modo de falha. Um comportamento é considerado adequado quando todas as peças testadas apresentam o mesmo modo de falha. Com isto tem-se a segurança em dizer qual a parte do componente que possui menor resistência à fadiga. No entanto, ter componentes com o mesmo modo de falha não é fácil, uma vez que a fadiga é um processo essencialmente localizado. Desta forma, deve-se entender a importância da concentração de tensões devido a variações de dimensões e estado de superfície (entalhes mecânicos, raios de concordância, rasgos, etc.) e tensões residuais de tratamento mecânico ou térmico.

2.5 Conformação Mecânica por Martelamento

Para a manufatura do eixo monobloco tubular, uma das principais operações é a conformação mecânica por martelamento. A operação de martelamento consiste em um conjunto de matrizes dispostas simetricamente e que oscilam no sentido radial. Durante o martelamento, as matrizes opostas aplicam forças radiais no centro da peça com oscilações de alta frequência.

O tubo no estado de recebimento é direcionado e conduzido gradualmente através das matrizes e, devido ao movimento de oscilação radial, o mesmo adquire o perfil das matrizes. Isto pode ser verificado conforme a figura 2.7.

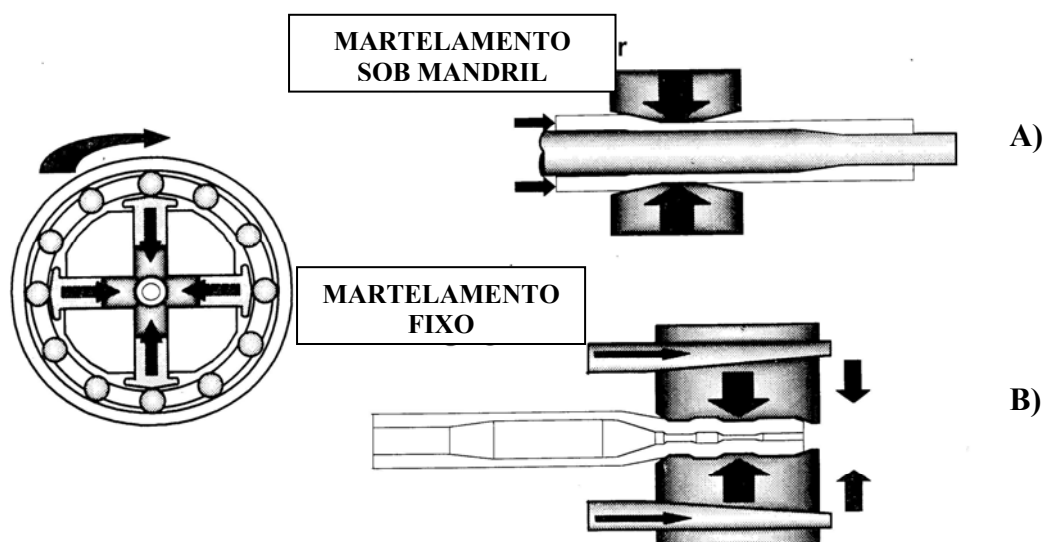


Figura 2.7 Desenho esquemático de dois processos de martelamento: A) Martelamento sob mandril e B) Martelamento fixo. (GKN Alemanha)

A conformação por martelamento ocorre através da oscilação radial das matrizes. Quando as matrizes estão fechadas, as mesmas conformam o tubo conforme o perfil desejado. No momento que as matrizes estão abertas, as mesmas permitem que o tubo gire e/ou avance de posição, assim permitindo uma conformação uniforme ao longo de toda a peça.

O martelamento pode ser realizado à frio ou à morno e a matéria-prima pode ser tubos com ou sem costura e barras de qualquer formato. No caso dos eixos monoblocos tubulares apresentado neste trabalho, o processo de martelamento utilizado é à frio e a matéria prima é de tubos sem costura. Apesar do custo maior, a utilização de tubo sem costura evita os tradicionais problemas de anisotropia do material junto à solda como nos tubos com costura. (IMANINEJAD, 2004)

O processo de martelamento pode ser dividido em três grupos:

- Martelamento com avanço: A peça é empurrada através das matrizes. Esta operação geralmente visa redução de diâmetro e aumento de espessura para tubos. A não utilização de dispositivos contra-pressão é recomendado para evitar dobras internas.

- Martelamento fixo: A peça é somente posicionada entre as matrizes e não há movimento de avanço. Neste processo consegue-se gerar reduções de diâmetro e encaixes localizados. Geralmente esta é a última operação e as matrizes possuem o perfil final da peça.

- Martelamento sob mandril: Aplicado para peças tubulares, onde a mesma é conduzida através das matrizes com um mandril interno. Esta operação geralmente visa a calibração da espessura de parede da peça. Neste caso, o mandril interno também evita a ruptura da parede do tubo (COLLA, 1997).

Uma das vantagens do martelamento com relação aos processos usuais de fabricação de peças automotivas (ex. usinagem, fresamento, etc...) é que não há remoção de material, tendo a matéria prima aproximadamente o peso da peça final.

Outra vantagem é que durante o processo de martelamento geram-se linhas de escoamento no material, que aumentam a resistência mecânica da peça por encruamento. Por fim o martelamento não remove o fibramento original da matéria-prima. Conforme apresentado na figura 2.8, onde é comparado o fibramento de uma peça usinada com uma peça conformada por martelamento.

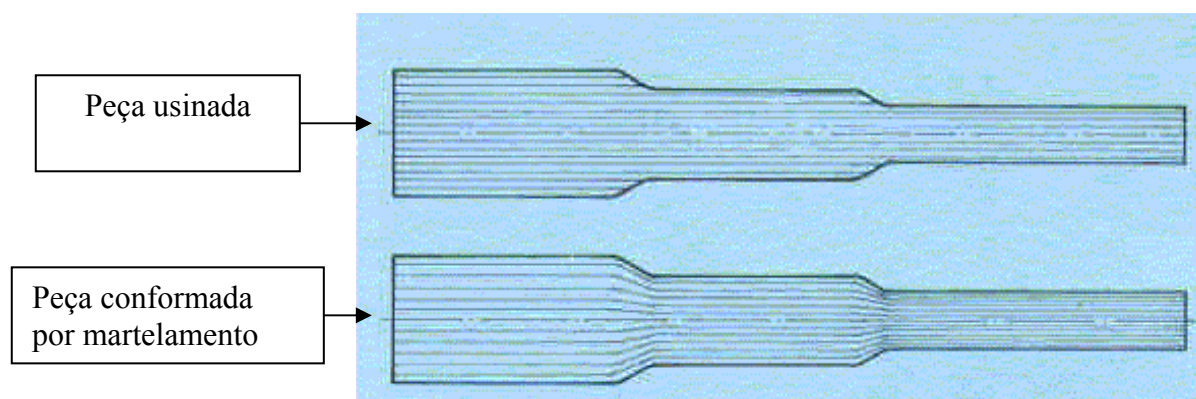


Figura 2.8 Comparação entre peça usinada e conformada por martelamento. (Fells GmbH Maschinenfabrik)

Na peça conformada por martelamento as linhas de escoamento do material são mantidas e ocorre aumento de resistência mecânica por encruamento. (SHIJIAN, 1999) O mesmo não acontece com a peça usinada, onde as linhas de escoamento são interrompidas.

Para o processo de martelamento a frio, a determinação da microestrutura e a dureza do material são fundamentais para se determinar o limite máximo de conformação. (NASTRAN, 2003)

Uma das microestruturas com melhor conformabilidade é a esferoidizada (METALS HANDBOOK –ASM, 1978). A microestrutura perlítica possui menor conformabilidade quando comparada com a microestrutura esferoidizada. O limite máximo de conformação de uma microestrutura perlítica depende da distância lamelar, o estado de tensões e a dureza do material.

Os aços com dureza até 85 Rockwell B são os que permitem maior grau de conformação por martelamento. Os aços com dureza acima de 105 Rockwell B não podem ser conformados por martelamento devido a sua baixa conformabilidade (METALS HANDBOOK – ASM, 1978).

Outra forma de se determinar o limite máximo de conformação é através da resistência à tração do material. Quanto mais baixo for o limite de resistência à tração, melhor serão as condições de martelamento. Um valor de resistência à tração considerado bom para o martelamento é abaixo de 650 MPa. (GKN Alemanha)

O percentual de carbono também tem alta influência no limite máximo de conformação por martelamento a frio. (RAJAN, 2002) Quanto mais alto for o percentual de carbono, mais baixo será o limite máximo de conformação. Para aços com percentual de

carbono em torno de 0,20% à 0,30%, os mesmos podem ser conformados até 50% de redução de área (área inicial com relação área final após conformação). No entanto, para estes casos de elevada redução de área tem a tendência de gerar dobras internas. Estas dobras internas normalmente possuem profundidade de 0,1 a 0,4mm. A figura 2.9 apresenta um exemplo de eixo monobloco martelado com dobras internas.

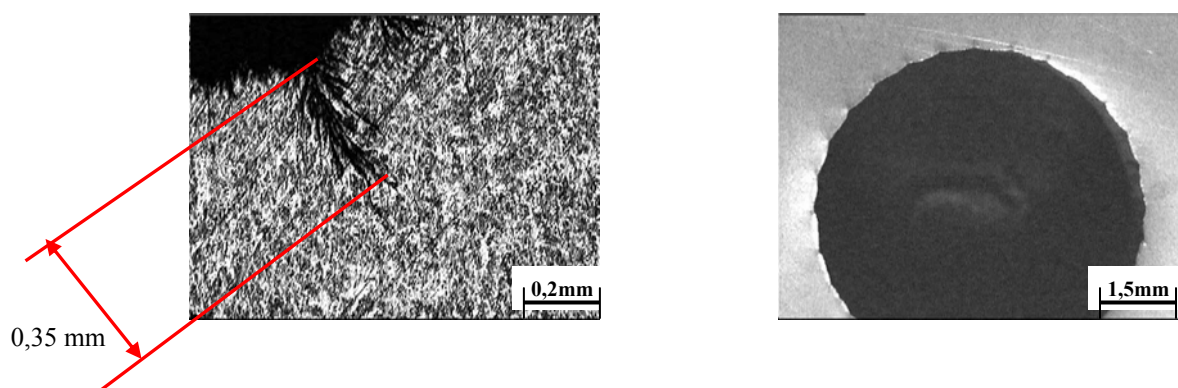


Figura 2.9 Dobras internas provenientes do processo de martelamento. (GKN Alemanha)

A conformação por martelamento tem se mostrado um processo eficaz e econômico para muitas aplicações na indústria automotiva, pois praticamente toda a matéria prima se transforma em produto final. (NÄGELE, 2000)

Um limitante do processo é a vida útil das matrizes, podendo, no entanto, ser melhorada através dos seguintes ações:

- Utilização de materiais mais resistentes, como Metal Duro; (VALQUEZ, 2000)
- Condição de lubrificação das matrizes; (LAZZAROTTO, 1998)
- Otimização da geometria / perfil das matrizes; (GROSMAN, 1996) (HANSEN, 1999)
- Ajuste ótimo da taxa de alimentação da peça durante a conformação.

(HEBDZYNSKI, 1997)

2.6 Processo de Conformação do entalhado

Em função do eixo monobloco ser tubular, o mesmo não permite a conformação do entalhado pelo processo convencional de rolagem utilizado em eixos maciços. O eixo monobloco deforma e fica com seu diâmetro externo ovalizado, quando submetido ao processo de rolagem. Visando resolver este fato, o entalhado do eixo monobloco tubular é gerado através do processo de extrusão inversa.

O processo de conformação do entalhado consiste na utilização de uma prensa hidráulica, onde o eixo é submetido através de uma matriz com o perfil final do entalhado conforme apresentado no desenho esquemático da figura 2.10.

Durante a extrusão inversa, a ponteira do eixo com diâmetro previamente definido é conformada preenchendo os espaços da matriz e, formando assim, o entalhado. A vantagem deste processo é que se consegue manter o erro de divisão muito próximo ao próprio valor da matriz. Com esta melhoria de qualidade no entalhado se consegue valores mais uniformes de montagem do eixo monobloco tubular com as juntas homocinéticas e isto auxilia a diminuição de ruído, desconforto e vibração no veículo.

Para que o processo de conformação do entalhado seja economicamente viável é importante que a matriz possua alta durabilidade. Para se manter esta durabilidade tem-se trabalhado com os seguintes aspectos:

- Material da matriz, geralmente utiliza-se metal duro.
- Revestimento da matriz, geralmente utiliza-se nitreto de titânio. (LUGSCHEIDER, 2004)
- Lubrificação da matriz durante a conformação.

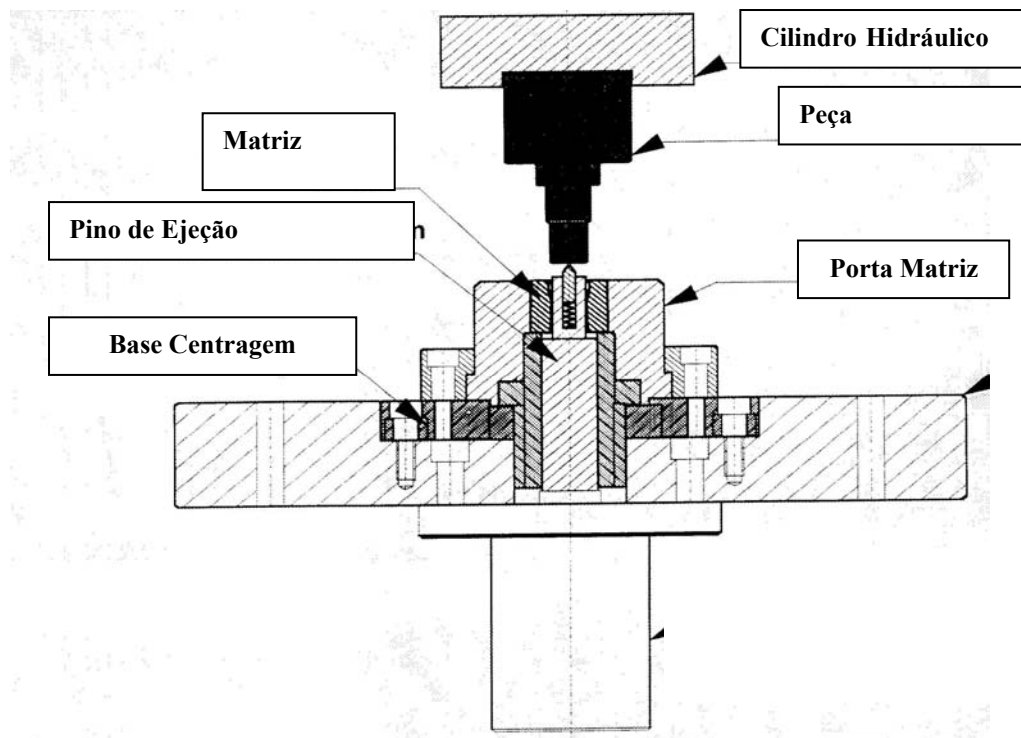


Figura 2.10 Representação esquemática das principais partes da prensa hidráulica para conformação do entalho. (GKN Alemanha)

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado com três amostras (A, B e C) que seguiram o fluxograma descrito na figura 3.1.

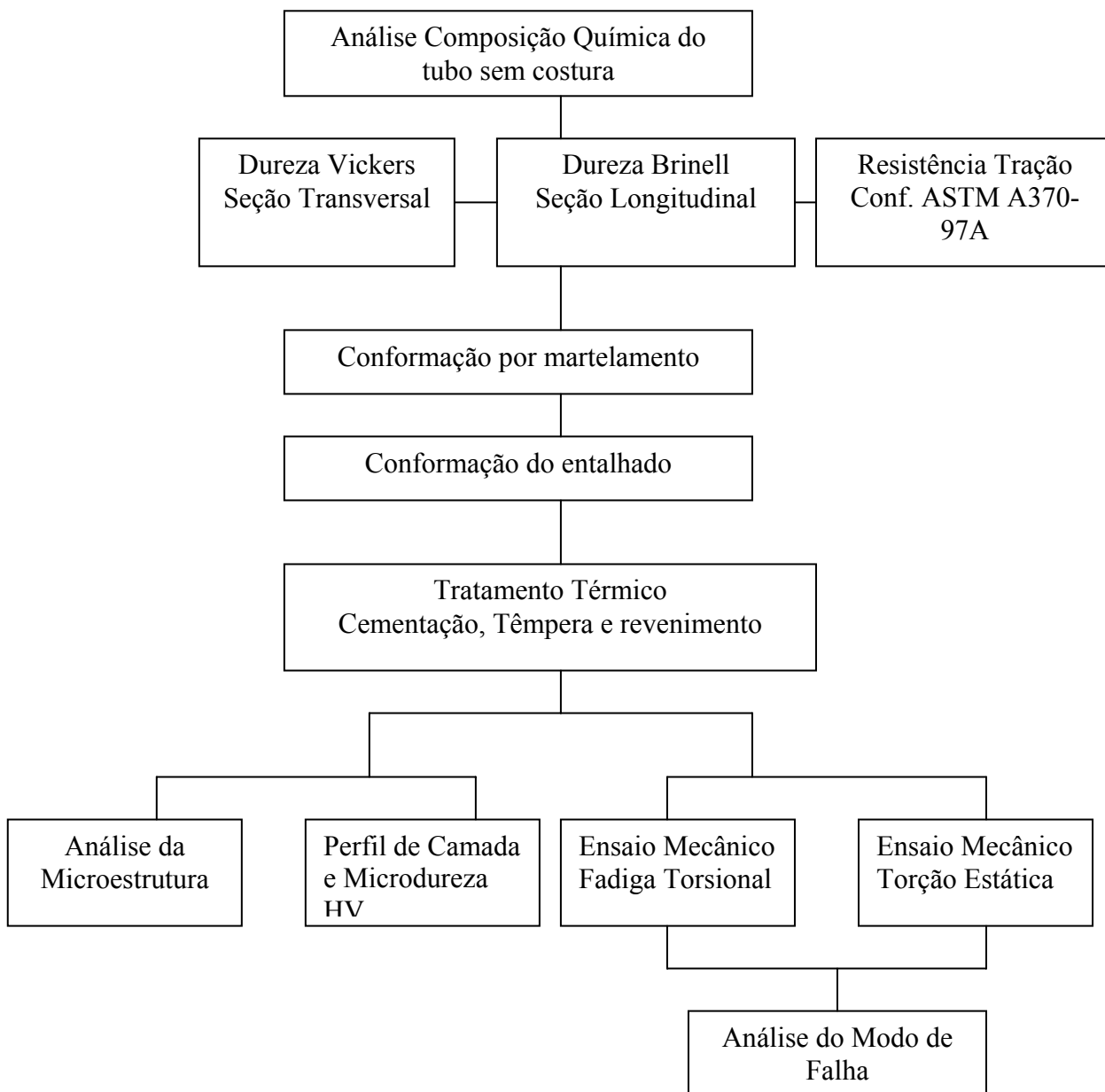


Figura 3.1 Fluxograma do desenvolvimento do Procedimento Experimental.

3.1 Material SAE 4130H

O material SAE 4130H é classificado como um aço ligado para beneficiamento ou aço para construção mecânica. O mesmo é usualmente utilizado na indústria automotiva e petrolífera. Geralmente este material é encontrado na forma de tubos com ou sem costura, chapas ou tiras (CHIAVERINI, 1990). Seu estado de fornecimento é geralmente normalizado (NBK) ou recozido (GBK).

A designação 41XX é para aços cromo-molibdênio. Sendo que o cromo em teores baixos aumenta a resistência, o limite elástico, a tenacidade e a resistência ao choque e o molibdênio visa aumentar a resistência mecânica.

A composição química usual do SAE 4130H é conforme Tabela 3.1 (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1993 a, b).

Tabela 3.1 Composição química usual do aços SAE 4130H - (% em peso).

SAE 4130H	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
Alto P	0,33	0,70	0,035	0,040	0,15	0,75	0,15
Baixo P	0,27	0,30	0	0	0,35	1,20	0,25

A faixa de temperabilidade do SAE 4130H conforme ensaio Jominy é apresentada na figura 3.2.

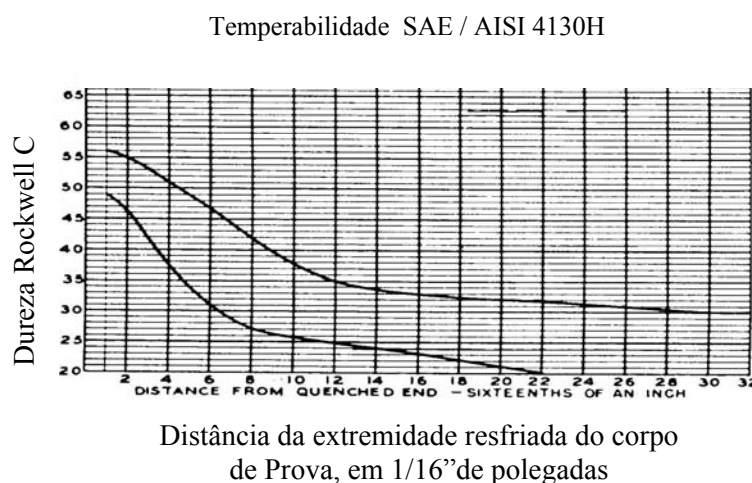


Figura 3.2 Gráfico representativo da temperabilidade do aço SAE 4130H conforme ensaio Jominy. (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1993b)

Realizou-se uma caracterização de 3 amostras (A, B e C) através da determinação da composição química de cada uma via análise espectrometria. Os valores de composição química encontrados estão descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Composição química das amostras A, B e C. Aço SAE 4130H (% em peso).

Amostra	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	Ti
A	0,25	0,72	0,011	0,002	0,23	0,03	1,10	0,24	0,034	0,03	0,002
B	0,25	0,73	0,011	0,003	0,23	0,04	1,15	0,25	0,029	0,03	0,002
C	0,23	0,82	0,012	0,007	0,25	0,02	0,90	0,31	0,018	0,01	0,002

Observando os resultados acima, verifica-se que as composições químicas obtidas nas amostras A, B e C encontram-se próximo da faixa definida para o material SAE 4130H.

3.2 Tratamento Térmico e Ciclo de Cementação e Têmpera

Visando atender as especificações do projeto do componente, tais como, dureza superficial, dureza de núcleo, microestrutura e profundidade de camada, busca-se controlar os parâmetros do ciclo de cementação e têmpera. Os principais parâmetros controlados são os seguintes:

- Percentual de Monóxido de Carbono (% CO): 0,8% durante 10 minutos, 0,9% durante 40 minutos, 0,7% durante 90 minutos e 0,6% durante 10 minutos.

- Tempo de Cementação: 150 minutos

- Temperatura de Cementação: 930°C

- Temperatura de Têmpera: 860°C

- Temperatura do óleo de Têmpera: 60°C

- Temperatura do Revenimento: 180°C

- Tempo de Revenimento: 60 minutos

As 2 amostras (A, B) foram submetidas aos mesmos parâmetros acima mencionados.

Durante o ciclo de tratamento térmico deve-se controlar os parâmetros para evitar a formação de austenita retida e aumento excessivo do tamanho de grão, uma vez que os mesmos diminuem a resistência em fadiga torsional do componente.

O eixo monobloco tubular possui a particularidade de cementar a peça externamente e internamente e, com isto, gerar um perfil de dureza tipo “U”, que é altamente benéfico para a resistência em fadiga torsional do componente.

3.3 Caracterização Metalúrgica

A caracterização metalúrgica será dividida em matéria prima e componente após martelamento e tratamento térmico.

3.3.1 Metalografia

Matéria Prima – Tubo sem costura

Visando uma melhor conformação à frio, menor desgaste de ferramenta e uma menor suscetibilidade à formação de trincas durante o processo, a matéria-prima deve possuir uma microestrutura mais homogênea possível e de menor resistência mecânica. (JHAZI, 2000) Neste caso, busca-se uma microestrutura esferoidizada (METALS HANDBOOK, 1978).

Quando uma microestrutura esferoidizada não pode ser obtida em função de custo e tempo de tratamento térmico, pode-se ter uma microestrutura constituída basicamente por ferrita e perlita esboroada. Para se obter esta microestrutura, a matéria prima sofre após a operação de trefilamento um tratamento térmico de normalização seguido de um recozimento subcrítico. Este ciclo de tratamento térmico possibilita o esboroamento da perlita.

A presença de constituintes de elevada resistência, tais como bainita e martensita, são altamente indesejados, uma vez que podem propiciar a formação de trincas.

As amostras foram preparadas para metalografia através de lixamento a úmido, polimento com pasta de diamante e ataque químico com Nital 5%. Após as amostras foram analisadas em microscópio ótico.

Componente após martelamento e tratamento térmico

Em função do componente em estudo possuir paredes delgadas e ser submetido à cementação seguida de têmpera em óleo e revenido, espera-se obter uma microestrutura martensítica revenida. Também é possível obter-se austenita retida em quantidades menores que 10%, sendo esta não desejada em função de possuir menor resistência mecânica / dureza.

As amostras para verificação da microestrutura foram preparadas da seguinte forma: corte transversal, lixamento a úmido, polimento em pasta de diamante e ataque em Nital 5%.

3.3.2 Perfil de dureza e Ensaio de Tração

Matéria Prima – Tubo sem costura

Busca-se uma dureza menor possível para facilitar as operações de martelamento. Logo, foi realizado o ensaio de Dureza Brinell segundo a norma ASTM E10-01^(ASTM E10-01). Utilizou-se uma carga de 187,5kgf e uma esfera com 2,5mm de diâmetro em corpos-de-prova de 65,0mm de comprimento, imprimindo-se três pontos sobre uma pista previamente preparada na superfície externa, como mostrado na figura 3.3.

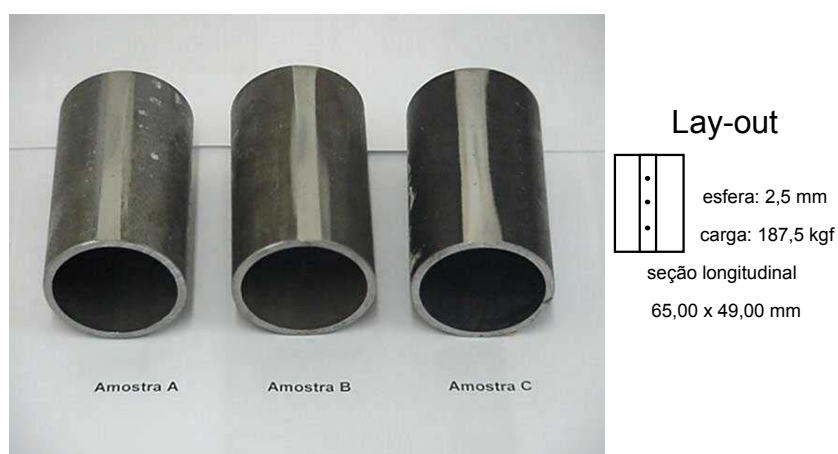


Figura 3.3 Corpos de prova preparados para ensaio de dureza Brinell.

Também foi realizado ensaio de dureza Vickers segundo a norma ASTM E92-82^(ASTM E92-82) na seção transversal das amostras, pois a deformação propiciada pelo processo é realizada perpendicularmente a esta seção.

O ensaio foi realizado com uma carga de 10kgf em três pontos separados entre si por um ângulo de 90° , no centro da espessura da parede da seção transversal de três anéis cortados cuja superfície foi devidamente preparada através de acabamento com lixa de 320 mesh. Na figura 3.4 são apresentados os corpos-de-prova utilizados no ensaio de dureza Vickers (HV10).



Figura 3.4 Corpos de prova preparados para ensaio de dureza Vickers (HV10).

Visando conhecer melhor as propriedades da matéria prima, realizou-se um ensaio de tração. Para o ensaio, foram retirados em cada amostra, dois corpos-de-prova do tipo fita com rebaixo, com aproximadamente 300 mm de comprimento. O ensaio foi realizado segundo procedimentos da norma ASTM A370-97a^(ASTM A370-97a).

A figura 3.5 apresenta a geometria do corpo de prova utilizado no ensaio de tração.

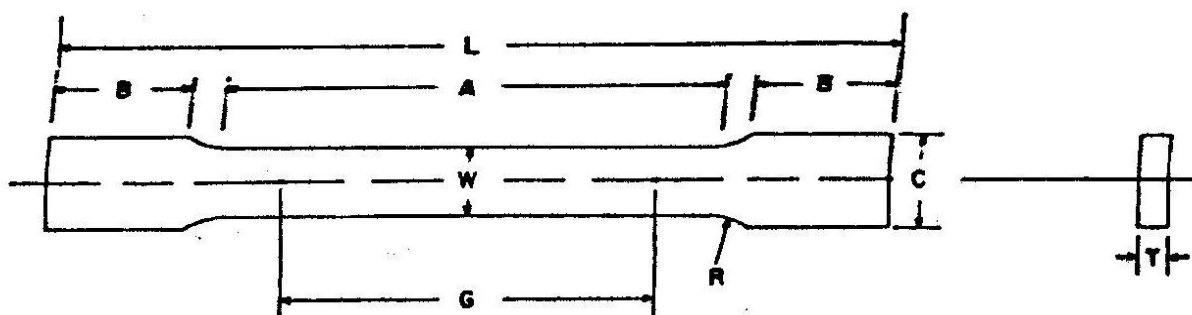


Figura 3.5 Geometria das amostras A, B e C preparados para ensaio de tração. Dimensões básicas: (L)= 100mm mínimo, (A)= 32mm mínimo, (B)= 32mm mínimo, (C)= 10mm, (R)= 6mm mínimo, (T)= 3mm, (W)= $6,25 \pm 0,05$ mm e (G)= $25 \pm 0,08$ mm.^(ASTM A370-97a)

Os tubos trefilados também podem ser especificados por seu limite de resistência a tração (RT), sendo admissível para este material um limite de resistência à tração máximo de 650MPa.

Componente após martelamento e tratamento térmico

Em função do componente ser cementado, tem-se um percentual de carbono em torno de 0,7 à 0,8 próximo à superfície. Este percentual diminui quando se vai em direção ao núcleo da peça. Em torno da profundidade de 1mm, tem-se aproximadamente o percentual de carbono existente na matéria prima. A dureza do componente possui relação direta com o percentual de carbono. Desta forma, tem-se valores de dureza mais altos nas superfícies e menores no núcleo.

O eixo monobloco tubular por ser conformado a partir de um tubo, o mesmo é cementado na parede externa e interna. Realizando um perfil de dureza ao longo de toda a parede do componente, pode-se encontrar um perfil tipo "U", onde nas duas superfícies, externa e interna, têm-se durezas mais elevadas. Este perfil tipo "U" é altamente benéfico para o comportamento em fadiga, uma vez que na parede interna tem-se também o efeito da tensão residual compressiva.

A dureza de núcleo mantém-se elevada, uma vez que o eixo monobloco tubular possui paredes delgadas e a matéria prima SAE 4130H possui boa temperabilidade.

O perfil de dureza foi realizado medindo microdureza Vickers a cada 0,1 mm.

3.4 Ensaio Mecânicos

O semi eixo homocinético possui a função primária de transmissão de torque entre a caixa de câmbio e as rodas motrizes. A capacidade de transmissão de torque do semi-eixo é calculado com relação à potência e ao torque do motor. Portanto, durante o projeto de um semi-eixo deve-se levar em consideração a aplicação do mesmo no veículo e os requisitos especiais do cliente (lay out, peso, rigidez torsional, etc...). A partir destas considerações são determinados os valores dimensionais e metalúrgicos da peça. Após a definição do projeto são construídos protótipos para validação. Os protótipos visam comprovar que os dados do projeto atendem as especificações do cliente. A validação do eixo monobloco

tubular com camada cementada na parte externa e interna é realizada por basicamente dois testes:

- Fadiga Torsional
- Torção Estática

3.4.1 Fadiga Torsional

A fadiga torsional se caracteriza por aplicação alternada de torque ao componente. Este teste visa verificar a vida do componente quando submetido à aplicação de torque do motor. O torque máximo aplicado no semi-eixo homocinético é em primeira marcha ou marcha ré. Normalmente são definidos três níveis de torque: Alto torque, Médio torque e baixo torque. Para cada nível de torque o componente deve atingir um número de ciclos sem apresentar falha ou fratura. Desta forma é possível criar um gráfico e traçar uma curva mínima de aprovação. Se o semi-eixo homocinético estiver acima do valor mínimo da curva, o mesmo estará aprovado. Os valores de torque são definidos pelo peso do eixo dianteiro do veículo, torque máximo da caixa de câmbio e relação de marchas.

No caso do eixo monobloco tubular, os níveis de torque determinados para o teste de fadiga e suas respectivas quantidades foram as seguintes:

- Alto Torque: 1200 Nm para 4 peças
- Médio Torque: 850 Nm para 1 peça
- Baixo Torque: 700 Nm para 4 peças

Para o médio torque é testado normalmente de 01 a 02 peças somente para verificar que não há inflexão da curva mínima de aprovação. A comparação com testes antigos, muitas vezes não é recomendável devida a melhoria nos equipamentos de teste e qualidade do aço em termos de características macro e microestrutura ^(DAVOLI, 2003).

As demais condições de teste são as seguintes:

- Frequência de 3 a 6Hz
- Ângulo da junta fixa e deslizante igual a 0°
- Graxa no entalhado para lubrificação.
- Temperatura das juntas não superior a 80°C. Controle realizado por ventilação forçada.

A máquina utilizada para realização do ensaio de fadiga torsional é da marca MTS com atuador servo controlado hidráulico rotacional. Deve-se ressaltar que este equipamento aplica o torque em ambos sentidos permitindo estabelecer uma relação direta com a aplicação. Não há conversão de resultados de teste de fadiga uniaxial para torsional como normalmente ocorre neste tipo de teste (KIM, 2002).

3.4.2 Torção Estática

Busca-se aplicar um torque crescente até a ruptura do componente. O objetivo deste teste é verificar se nenhum componente apresenta ruptura quando submetido a um torque menor que o torque máximo aplicado pelo motor. O teste é realizado com as juntas em ângulo para simular a pior condição em veículo que seria com as rodas esterçadas, onde além do momento torsional tem-se um momento de flexão.

Normalmente é realizada uma curva tensão versus deformação. Com esta curva consegue-se algumas informações importantes, tais como: limite de deformação elástico, tensão máxima, tensão de ruptura, deformação permanente e rigidez torsional.

Neste ensaio também é importante verificar o modo de falha. Da mesma forma que no ensaio de fadiga, um mesmo modo de falha representa um bom resultado.

No caso do eixo monobloco tubular, o teste foi realizado na seguinte condição:

- Três níveis de torque baseados no peso do veículo:
- Primeiro Nível: 1656Nm. Aplica-se este torque por 0,5 segundos e retorna-se a 0Nm. O objetivo é retirar as folgas do sistema.
- Segundo Nível: 1840Nm. Aplica-se este torque e retorna-se a 0Nm. O objetivo é verificar a deformação permanente.
- Terceiro Nível: 2660Nm: Aplica-se este torque e o componente não pode apresentar ruptura com torque menor que este valor. Normalmente se ultrapassa o valor do terceiro nível até o rompimento do componente para verificar o torque de ruptura e o modo de falha.

Os ângulos utilizados são: Junta Fixa 40° e Junta Deslizante 10°. A máquina utilizada para realização do ensaio de torção é da marca MTS com atuador hidráulico rotacional.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Metalúrgica

A caracterização metalúrgica será dividida em matéria prima e componente após martelamento e tratamento térmico.

4.1.1 Metalografia

Matéria Prima – Tubo sem costura

Nas figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 observa-se uma microestrutura homogênea formada por grãos finos e de tamanhos variados constituída basicamente por ferrita e perlita esboroada. Esta estrutura demonstra claramente que as amostras A e B após serem trefiladas, sofreram o tratamento térmico de normalização seguido de um recozimento subcrítico o que possibilitou o esboroamento da perlita. No recozimento subcrítico o carboneto que compõe as lamelas da perlita decompõe-se em pequenas partículas esféricas (esboroamento), proporcionando a formação da perlita esboroada com menor resistência mecânica que a perlita lamelar. A modificação da perlita, como pode ser observada nas micrografias apresentadas, teve grande influência nos resultados dos ensaios de dureza (HB e HV10) e tração para as amostras A e B.

No caso da amostra C pode-se observar uma microestrutura com aspecto um pouco diferente das microestruturas apresentadas nas amostras anteriores. Observando as figuras 4.5 e 4.6 nota-se uma maior heterogeneidade no tamanho e forma dos grãos. Devido a temperabilidade relativamente elevada do aço SAE 4130H e às condições de tratamento térmico, há o risco da formação de constituintes de elevada resistência durante o processamento efetuado na trefilaria. Sendo que provavelmente a amostra C tenha sofrido após trefila somente o tratamento térmico de recozimento.

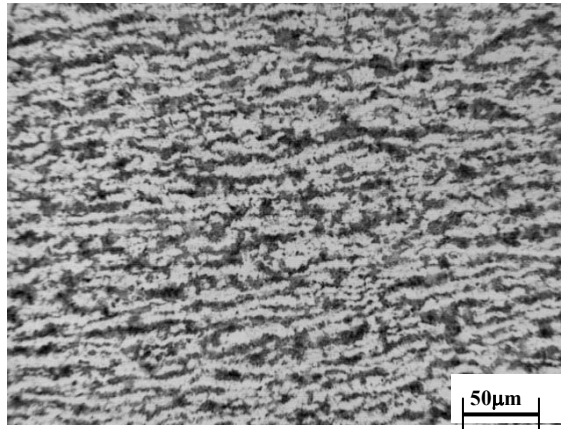


Figura 4.1 Microestrutura da Amostra A na condição de recebimento. Corte realizado na seção transversal. Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

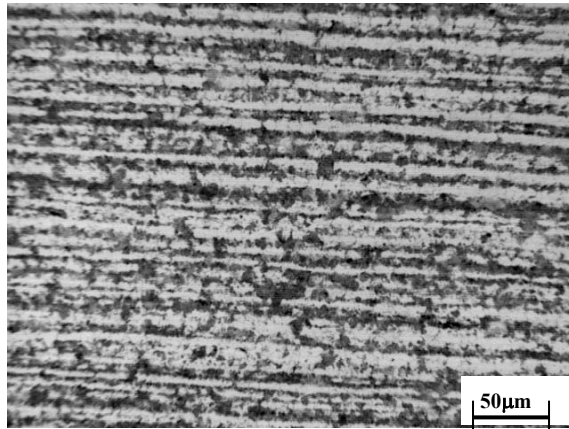


Figura 4.2 Microestrutura da Amostra A na condição de recebimento. Corte realizado na seção longitudinal. Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

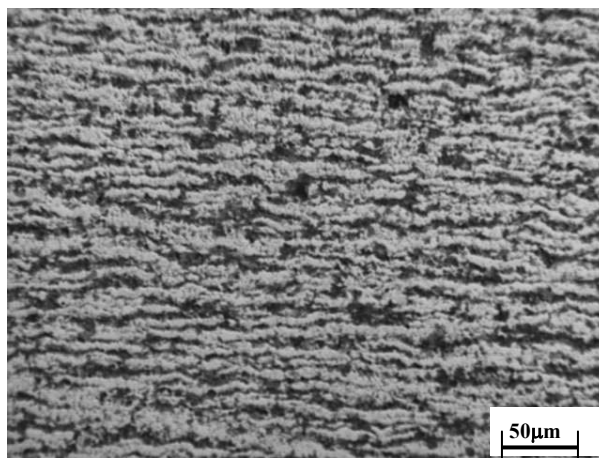


Figura 4.3 Microestrutura da Amostra B na condição de recebimento. Corte realizado na seção transversal. Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

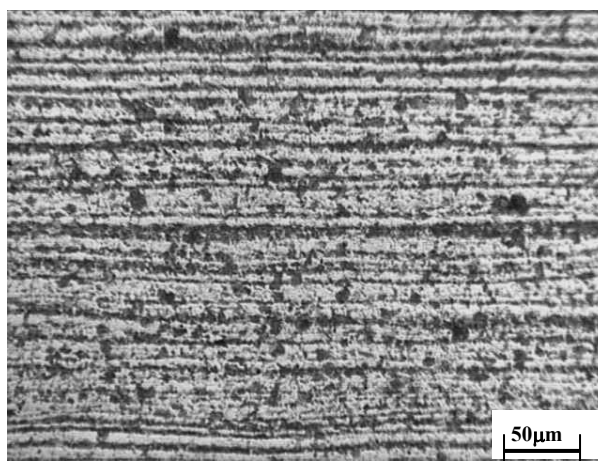


Figura 4.4 Microestrutura da Amostra B na condição de recebimento. Corte realizado na seção longitudinal. Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

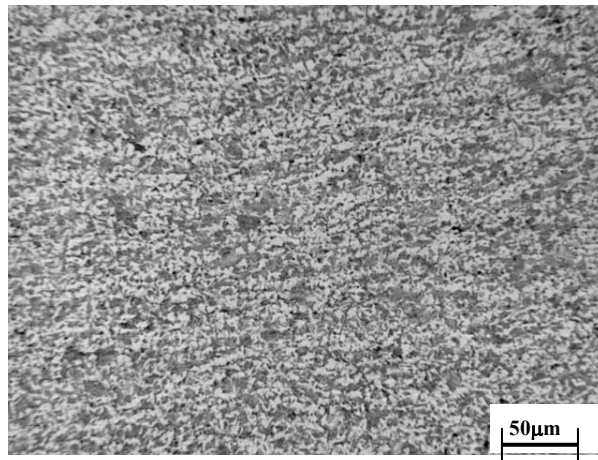


Figura 4.5 Microestrutura da Amostra C na condição de recebimento. Corte realizado na seção transversal. Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

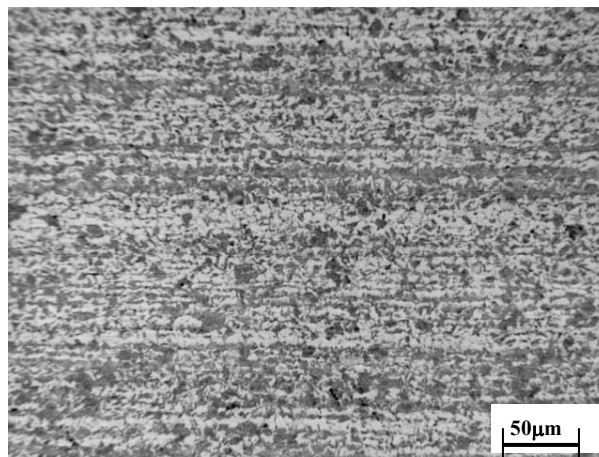


Figura 4.6 Microestrutura da Amostra C na condição de recebimento. Corte realizado na seção longitudinal. Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

Decidiu-se então fazer uma análise mais criteriosa da microestrutura presente na amostra C com a finalidade de verificar se houve a formação de bainita e martensita nesta amostra.

A figura 4.7 apresenta a microestrutura formada na superfície da amostra. Nesta microestrutura pode-se observar uma camada descarbonetada de pequena espessura, abaixo da qual aparecem algumas regiões de martensita em meio à bainita como constituinte predominante. Pode ser verificado pequena camada descarbonetada na superfície e algumas regiões de martensita em meio à bainita. A martensita e a bainita são microconstituintes indesejados no tubo no estado de fornecimento, pois os mesmos aumentam a resistência do material ao escoamento durante a conformação por martelamento.

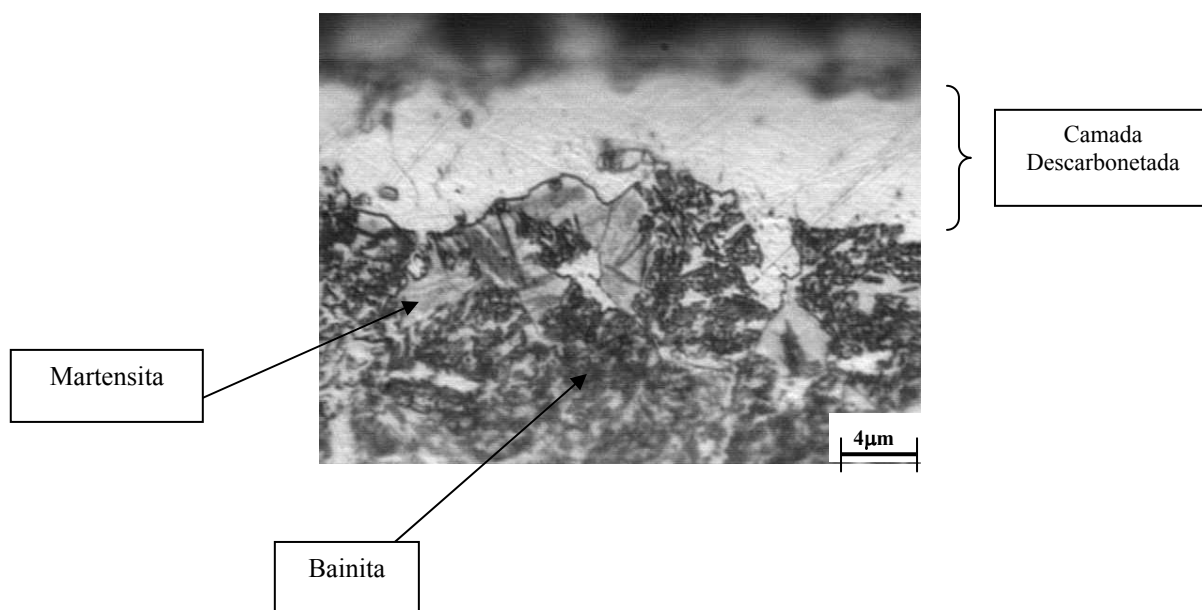


Figura 4.7 Microestrutura junto à superfície da amostra C. Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

Analisando-se a microestrutura de uma região situada entre a superfície e o centro da espessura da parede do tubo, observa-se na figura 4.8, uma faixa extensa formada por colônias de perlita, ilhas de ferrita e uma região martensítica no centro do campo de observação, que é um microconstituente indesejado na conformação por martelamento.

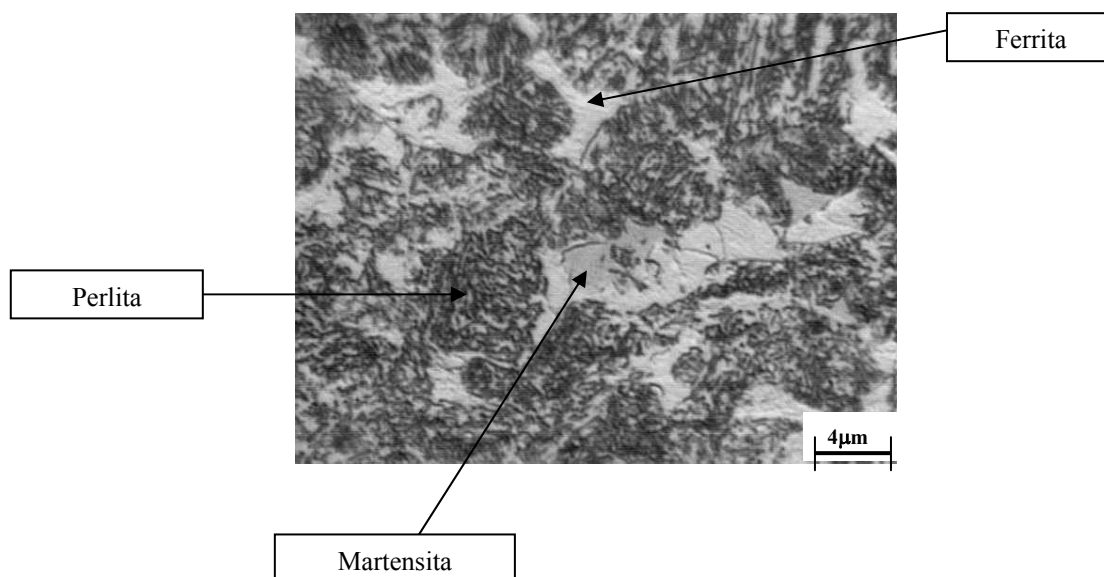


Figura 4.8 Microestrutura próxima à superfície (aprox. 0,3 à 0,5mm da superfície) da amostra C. Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

No centro da espessura da parede do tubo, conforme observado na figura 4.9, tem-se uma microestrutura formada por ferrita e colônias de perlita, que são microconstituintes desejados para a conformação por martelamento.

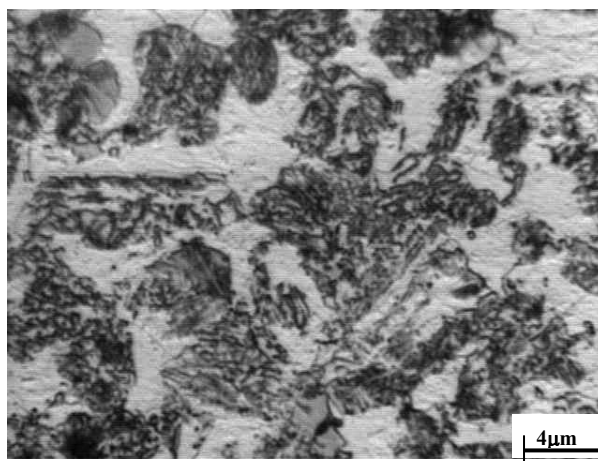


Figura 4.9 Microestrutura próxima ao centro (aprox.. 1,3 à 1,7mm da superfície) da amostra C. Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

Em resumo a amostra C apresenta na região próxima à superfície, os microconstituintes (martensita e bainita) que são caracterizados por uma elevada resistência mecânica.

A microestrutura presente na superfície dos tubos, torna-se um fator de grande importância, uma vez que a presença de bainita e/ou martensita como constatado na amostra C, propiciará a formação de trincas (figura 4.10), quando estes forem deformados a frio pelo processo de produção do eixo monobloco tubular. Neste estágio o eixo ainda não havia sido submetido ao tratamento térmico de cementação e têmpera. A origem desta trinca está ligada a microconstituintes, como bainita e martensita, já presentes no tubo em estado de fornecimento.



Figura 4.10 Eixo monobloco tubular fabricado com mesmo lote de matéria prima da Amostra C apresentou trinca de topo após conformação do entalhado.

Componente após martelamento e tratamento térmico

O eixo monobloco tubular por ser submetido ao processo de cementação, têmpera e revenido, a microestrutura resultante é a Martensita Revenida conforme demonstrado na figura 4.11. As amostras A e B sofreram tratamento térmico de cementação e têmpera.

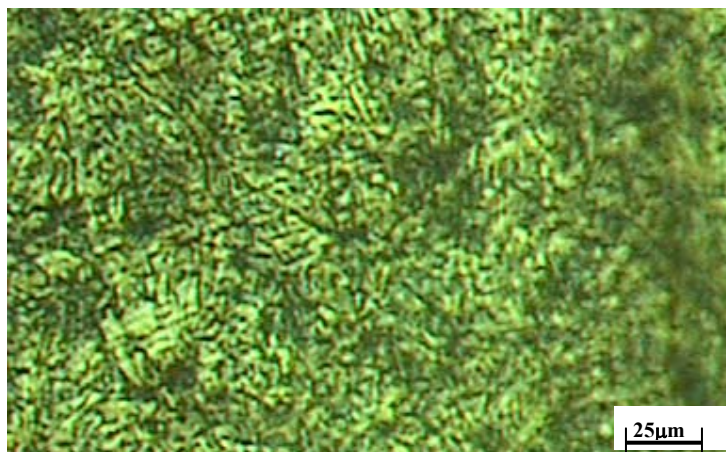


Figura 4.11 Metalografia do eixo monobloco tubular na região central demonstrando a microestrutura de martensita revenida. Matéria prima utilizada do mesmo lote da Amostra A. Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

Para se atingir a microestrutura acima apresentada, deve-se ter um rígido controle dos parâmetros de processo descritos na seção 3.2.

Um dos principais problemas do tratamento térmico do eixo monobloco tubular com material SAE 4130H é a formação de austenita retida conforme pode ser observado figura 4.12.

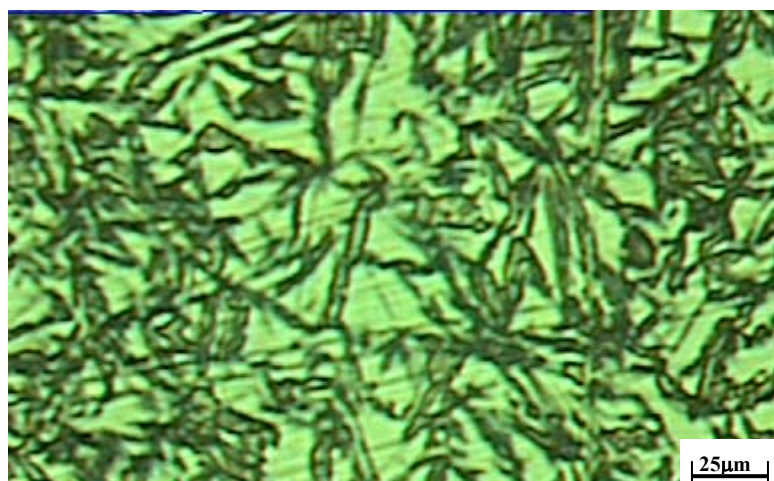


Figura 4.12 Metalografia do eixo monobloco tubular na região central demonstrando a microestrutura de martensita revenida e austenita retida (fase clara). Microscopia Óptica. Ataque Nital 5%.

A austenita retida ocorre geralmente quando o potencial de carbono é muito elevado nos últimos estágios da cementação. Com isto a peça fica com o carbono muito elevado na superfície. O carbono rebaixa de modo significativo a linha M_f de fim de formação da martensita. Isso devido ao fato do carbono em solução sólida aumentar a resistência ao cisalhamento da austenita sendo, portanto, necessário aplicar-se maior esforço para que comece o cisalhamento que leve ao início da formação da martensita (KRAUSS, 1985). No caso da amostra apresentada na figura 4.12, a matéria prima não se refere a nenhum dos lotes A, B e C e os parâmetros de tratamento térmico são os mesmos descritos na seção 3.2, porém, com o percentual de monóxido de carbono a 0,9 durante todo o tratamento de cementação.

Outro fator de que depende a retenção da austenita é a temperatura de austenitização. Quanto maior for a mesma, tanto mais para baixo é deslocada a linha M_s , em razão de se dissolver uma maior quantidade dos excessos de carbonetos na austenita, antes do resfriamento.

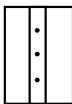
Nas amostras A e B que foram submetidas ao tratamento térmico de cementação e têmpera, não se constatou a presença de austenita retida, uma vez que os parâmetros utilizados foram os descritos na seção 3.2.

4.1.2 Perfil de dureza e Ensaio de Tração

Matéria Prima – Tubo sem costura


Os resultados apresentados na tabela 4.1 mostram que os valores médios de dureza obtidos para as amostras A e B são muito similares, enquanto que na amostra C observa-se que o valor médio é superior. Este valor médio de dureza maior na amostra C está relacionado com os microconstituintes (bainita e martensita). Desta forma, verifica-se uma melhor condição de martelamento nas amostras A e B. O ensaio de dureza Brinell foi realizado em 03 pontos ao longo da seção longitudinal do tubo (65,00 x 49,00mm). A carga utilizada foi de 187,5 kgf com esfera de 2,5mm.

Tabela 4.1 Ensaio de Dureza Brinell com as amostras A,B e C.

Ensaio de Dureza Brinell				
Pontos	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Lay-out
1	161	177	198	 esfera: 2,5 mm carga: 187,5 kgf seção longitudinal 65,00 x 49,00 mm
2	161	177	195	
3	161	177	195	
Média	161	177	196	
Desvio Padrão	0	0	1,73	

A tabela 4.2 mostra os resultados obtidos no ensaio de dureza Vickers (HV10) para os corpos-de-prova retirados das amostras A, B e C. A medição foi realizada em 03 pontos separados entre si por um ângulo de 90° ao longo da seção transversal do tubo (49,00mm x 3,00mm). A carga utilizada foi de 10kgf. Os valores de dureza obtidos nas amostras A, B e C demonstram que a amostra C possui valor médio superior. Este valor médio de dureza maior na amostra C está relacionado com os microconstituintes (bainita e martensita). Desta forma, verifica-se uma melhor condição de martelamento nas amostras A e B.

Tabela 4.2 Ensaio de Dureza Vickers (HV10) com as amostras A,B e C.

Ensaio de Dureza Vickers - HV10				
Pontos	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Lay-out
1	170	181	210	 seção transversal 49,00 x 3,00 mm
2	170	181	213	
3	170	181	210	
Média	170	181	211	
Desvio Padrão	0	0	1,73	

Os resultado do ensaio de tração estão descritos na Tabela 4.3. A medição foi realizada em 02 dois corpos de prova do tipo fita com comprimento aproximado de 300mm. O ensaio foi realizado conforme norma ASTM A370-97a^(ASTM A370 97a). Os valores de resistência à tração obtidos nas amostras A, B e C demonstram que a amostra C possui valor superior. Este valor maior de resistência à tração na amostra C está relacionado com os microconstituintes (bainita e martensita).

Tabela 4.3 Ensaio de Tração com as amostras A,B e C.

Ensaio de Tração				
Amostra		LE _{0,2%} (MPa)	RT (MPa)	AL (%)
A	A1	327	591	24
	A2	335	583	26
B	B1	378	613	25
	B2	363	636	24
C	C1	416	712	21
	C2	412	712	19

Observa-se que os resultados obtidos para as amostras A1, A2, B1 e B2 estão abaixo do valor máximo recomendado, 650MPa, possuindo, portanto, melhores condições de martelamento. Por outro lado, os valores de RT dos corpos-de-prova C1 e C2 apresentam-se acima do valor máximo recomendado^(GKN Alemanha).

A partir destas evidências, pode-se então verificar, que os resultados obtidos nos ensaios de dureza (HB e HV10) e do ensaio de tração (RT) da amostra C foram mais elevados devido à influência destes constituintes sobre o comportamento mecânico do material.

Nota-se ainda uma pequena diferença nos valores de dureza (HB e HV10) e do limite de resistência a tração (RT) entre as amostras A e B, sendo que os valores mais elevados correspondem à amostra B, o que pode estar associado aos maiores teores de níquel e cromo da amostra, demonstrando que provavelmente estes elementos contribuíram para a elevação da resistência do material.

Componente após martelamento e tratamento térmico

Os resultados de dureza do eixo monobloco tubular seguem na figura 4.13 abaixo, demonstrando o perfil “U” de dureza.

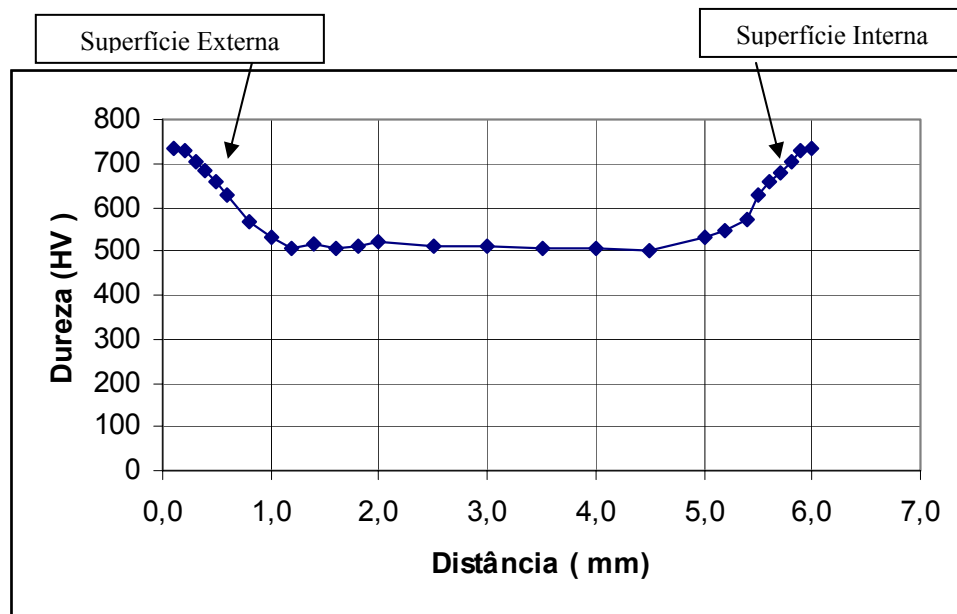


Figura 4.13 Perfil de dureza do eixo monobloco tubular na região próximo do entalhado (6mm de espessura) demonstrando o perfil em “U” devido a possibilidade de cementação e têmpera na superfície interna e externa. Matéria prima utilizada do mesmo lote da Amostra A.

4.2 Ensaio Mecânicos

4.2.1 Fadiga Torsional

O teste de fadiga torsional tem como resposta um número de ciclos por um torque aplicado. Normalmente, para semi-eixos homocinéticos a especificação de torque varia de 700 à 1200 Nm e o número de ciclos na ordem de milhões de ciclo à 50.000 ciclos.

A figura 4.14 apresenta o gráfico do teste de fadiga. Estes resultados são representativos da amostra B. O eixo monobloco tubular foi testado com os seguintes valores de torque e quantidade: Alto torque 1200Nm com 4peças, Médio Torque 850Nm com 1peça e Baixo Torque 700Nm com 4peças. Todas as peças romperam ou tiveram o teste interrompido acima da especificação mínima de aprovação. As peças do Baixo Torque tiveram os testes interrompidos, uma vez que não apresentaram falhas abaixo de 10^6 ciclos.

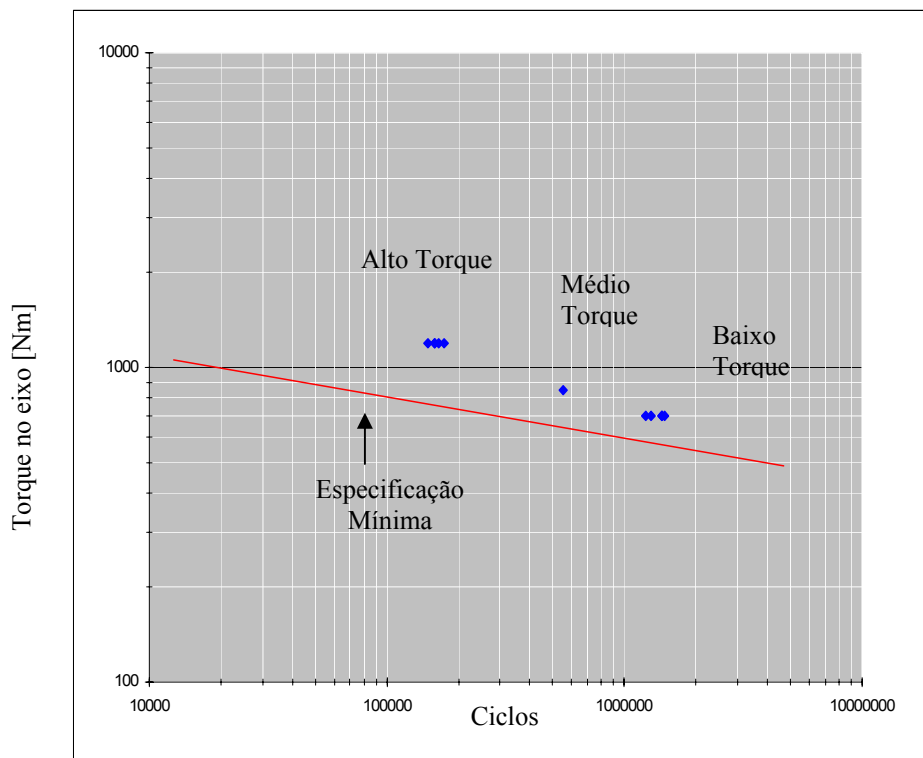


Figura 4.14 Torque aplicado no eixo (Nm) versus número de Ciclos para o eixo monobloco tubular da amostra B.

Os resultados do teste de fadiga torsional encontram-se na tabela 4.4. Estes valores correspondem ao gráfico da figura 4.14. Estes resultados são representativos da amostra B.

Tabela 4.4 Resultados do teste de fadiga torsional com três níveis de torque: 1200Nm, 850Nm e 700Nm.

Nível de Torque	Resultado Nº de Ciclos	Modo de Falha
1200Nm	159.829	Entalhado menor da Junta Fixa
1200Nm	164.568	Entalhado menor da Junta Fixa
1200Nm	159.000	Entalhado menor da Junta Fixa
1200Nm	148.034	Entalhado menor da Junta Fixa
850Nm	550.000	Entalhado menor da Junta Fixa
700Nm	1.297.618	Sem falhas. Teste interrompido
700Nm	1.437.128	Sem falhas. Teste interrompido
700Nm	1.475.000	Sem falhas. Teste interrompido
700Nm	1.431.911	Sem falhas. Teste interrompido

Com base nos resultados históricos de fadiga torsional para eixos maciços, pode-se afirmar que o mesmo possui valores iguais ou muitas vezes superiores em termos de desempenho em fadiga quando comparado com o eixo monobloco tubular^(GKN Brasil). Isto se deve principalmente em função da seção ser maciça e das tensões residuais compressivas na superfície do componente geradas durante o tratamento térmico de têmpera por indução.

Com relação ao modo de falha, geralmente nos eixos monobloco tem-se um tipo de falha característica, que é a ruptura no entalhado menor (lado junta fixa). Esta falha ocorre no diâmetro do fundo entalhado e se propaga a 45 graus até o final do entalhado. Após o final do entalhado a mesma se propaga no sentido longitudinal do eixo ou a 45 graus até entrar em colapso. A figura 4.15 demonstra um eixo monobloco tubular do mesmo lote da amostra B após o teste de fadiga.



Figura 4.15 Modo de falha característico para eixo monobloco tubular. A peça acima é do lote da amostra B.

A figura 4.16 apresenta em maior detalhe o modo de propagação da trinca de fadiga observado no ensaio de partículas magnéticas.

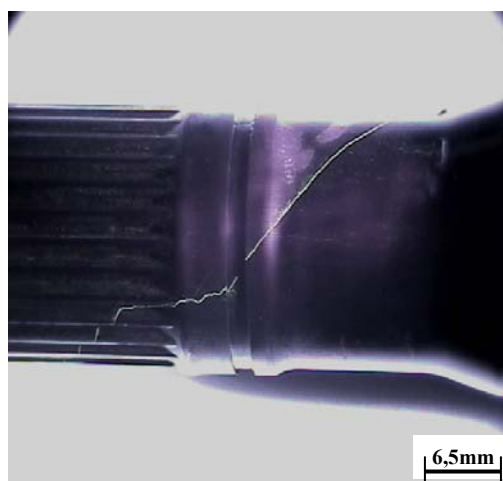


Figura 4.16 Modo de falha característico para eixo monobloco tubular observado no ensaio de partículas magnéticas. A peça acima é do lote da amostra B.

O início da falha no diâmetro do fundo do entalhado lado junta fixa, ou seja, parte externa da peça, foi evidenciado com a utilização de uma lupa. A figura 4.17 demonstra que várias marcas convergem para o início da falha.

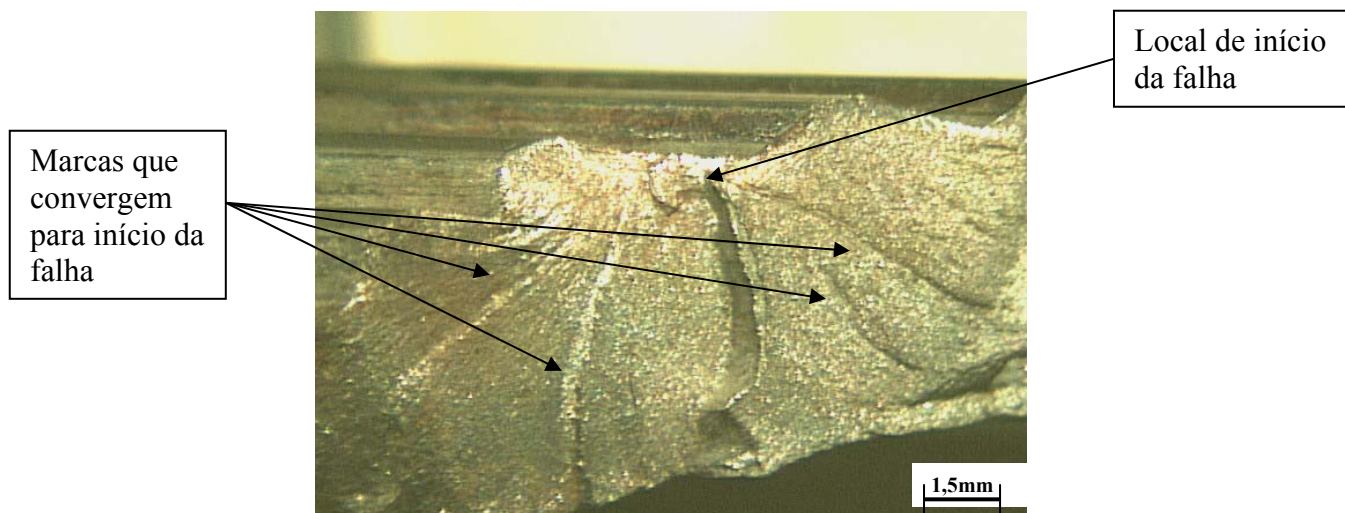


Figura 4.17 Início da falha ocorre na parte externa da peça junto ao diâmetro do fundo do entalhado lado junta fixa. A peça foi observada na lupa e demonstra que as marcas convergem para o local de início da falha. A peça acima é do lote da amostra B.

O início da falha no lado externo da peça era esperado, uma vez que no diâmetro externo tem-se uma tensão cisalhante maior. Desta forma, as dobras internas em torno de 0,1 à 0,4mm provenientes do processo de martelamento passam a não ter importância na vida em fadiga do componente.

4.2.2 Torção Estática

O semi-eixo homocinético deve ser projetado para que o torque máximo dado pelo motor nunca ultrapasse a região elástica. Desta forma, é realizado o teste de torção estática, onde gera-se uma curva de torque versus deformação. Com esta curva verifica-se a região elástica do componente e se compara com o torque máximo aplicado pelo motor. A figura 4.18 demonstra o gráfico da curva tensão versus deformação.

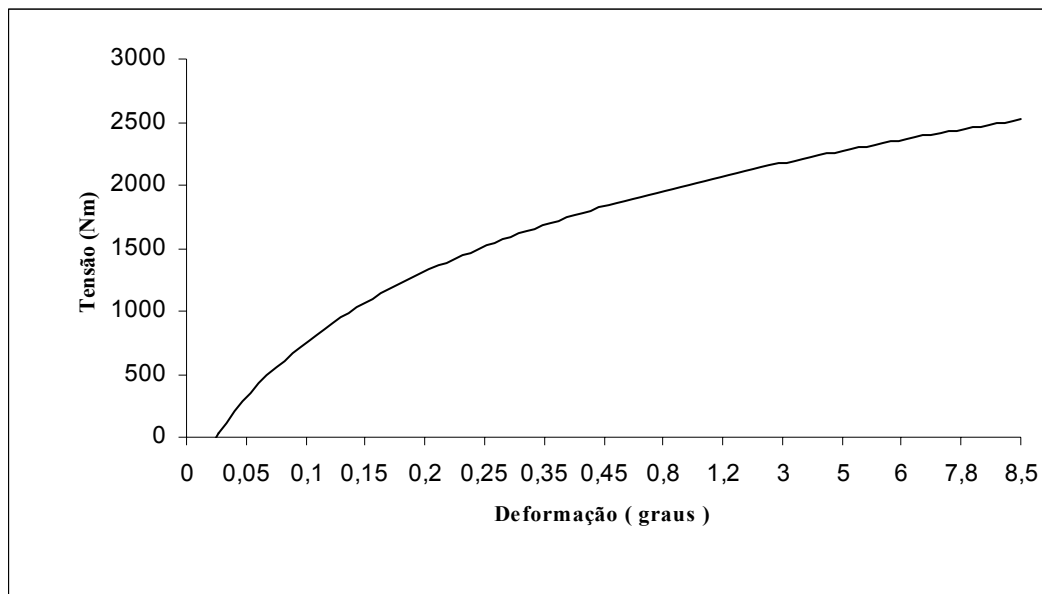


Figura 4.18 Curva torque aplicado para o eixo monobloco tubular da amostra B. Esta figura representa o teste no terceiro nível, onde o torque aplicado é de 2660Nm. Foram testadas 06 peças e nenhuma apresentou ruptura.

Os resultados do teste de torção estática encontram-se na tabela 4.5. Estes valores correspondem ao gráfico da figura 4.18. Estes resultados são representativos da amostra B.

Somente como referência, resultados semelhantes em termos de resistência à torção estática são obtidos com eixos maciços temperados por indução.

Tabela 4.5 Resultados do teste de torção estática para os níveis de torque: 1840Nm referente a segunda fase e 2660Nm referente a terceira fase. A tabela também demonstra a deformação permanente (graus).

Amostra	Torque (Nm)	Deformação Permanente (graus)	Modo de Falha
1	1840	0,45	Sem falhas
	2660	7,8	Sem falhas
2	1840	0,33	Sem falhas
	2660	8,1	Sem falhas
3	1840	0,28	Sem falhas
	2660	5	Sem falhas
4	1840	0,35	Sem falhas
	2660	4,4	Sem falhas
5	1840	0,59	Sem falhas
	2660	4,2	Sem falhas
6	1840	0,38	Sem falhas
	2660	4,8	Sem falhas

Neste ensaio, o componente também pode ser submetido até a ruptura, onde se verifica o modo de falha. Normalmente a ruptura ocorre no diâmetro menor lado externo do componente e a fratura se propaga a 45 graus formando uma “orelha de lobo”. As figuras 4.19 e 4.20 demonstram uma falha típica do teste de torção estática.



Figura 4.19 A falha ocorre na parte externa da peça junto ao diâmetro menor do junta fixa. A fratura se propagou a 45° formando uma “orelha de lobo”. A ruptura foi devido a aplicação de tensão acima do especificado. O valor de ruptura desta peça foi de aproximadamente 2800Nm. A peça acima é do lote da amostra B.



Figura 4.20 A falha ocorre na parte externa da peça junto ao diâmetro menor do junta fixa. A fratura se propagou a 45° formando uma “orelha de lobo”. A ruptura foi devido a aplicação de tensão acima do especificado. O valor de ruptura desta peça foi de aproximadamente 2800Nm. A peça acima é do lote da amostra B.

5.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho buscou-se destacar as vantagens referentes a ajuste de rigidez torsional, diminuição de peso e resposta em vibração e ruído do eixo monobloco tubular com relação aos demais eixos de ligação utilizados em semi-eixos homocinéticos. Apesar dos eixos maciços e tubulares soldados atingirem bons resultados nos testes de fadiga e torção estática devido as elevadas tensões residuais geradas no tratamento de têmpera por indução, mesmo assim, ainda ficam notórias as vantagens do eixo monobloco tubular perante estes tipos de eixos, principalmente no mercado automotivo, que dia a dia passa a ser mais exigente.

Outro ponto alcançado foi a descrição dos processos chave de manufatura deste eixo, tais como conformação por martelamento, conformação do entalhado e tratamento térmico de cementação e têmpera. Nos processos de conformação por martelamento e conformação do entalhado foram destacados a importância da vida útil das ferramentas para que o processo seja economicamente viável. No tratamento térmico para o material SAE 4130H se enfatizou os parâmetros de processo para se obter uma microestrutura martensítica com pequena quantidade ou ausência de austenita retida.

Destaca-se, também, a determinação do local de início da trinca no ensaio de fadiga torsional, comprovando que a mesma inicia no lado externo da peça. Com esta confirmação foi descartada a influência das dobras internas entre 0,1 a 0,4 mm no resultado da fadiga torsional.

Se comprovou a importância da microestrutura da matéria-prima composta por ferrita e perlita esboroada com valores de resistência à tração menores que 650 MPa para evitar a geração de trinca de topo após o trefilamento do entalhado. Esta microestrutura e resistência à tração são atingidas quando se realiza o tratamento térmico de normalização seguido de recozimento subcrítico.

6.0 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Entre as propostas de continuação deste trabalho, têm-se as seguintes sugestões:

- Viabilidade do processo de martelamento: Para tornar este processo mais competitivo perante os demais processos de fabricação de eixos de ligação, destaca-se o aumento da vida útil das ferramentas. Neste ponto podem ser realizados os seguintes trabalhos: busca de novos materiais, influência da orientação de laminação do “blank” e tratamentos superficiais (ex. nitretação iônica).

- Tensões Residuais: Em função do eixo monobloco tubular possuir alto grau de deformação plástica e posterior tratamento térmico de cementação e têmpera, uma análise com medições (ex. raio X) das tensões residuais seria de suma importância para ter-se melhor conhecimento deste componente.

- Matéria-Prima – Tubos com costura: Visando redução de custo e maiores opções de fornecimento, uma proposta de trabalho seria o desenvolvimento de eixo monobloco tubular a partir de tubo com costura. Esta proposta de trabalho fica complementada com a posterior realização de testes de torção e fadiga para conhecimento das propriedades mecânicas e do modo de falha.

- Eixos monobloco tubulares temperados por Indução: Também visando redução de custo e fluxo contínuo na linha de produção, o desenvolvimento do eixo monobloco tubular temperado por indução toma relevante importância.

No caso de desenvolvimento de eixos monobloco tubulares temperados por indução, segue abaixo alguns pontos críticos que podem ser desenvolvidos em trabalhos futuros:

- Matéria – Prima com % Carbono em torno de 0,35 e 0,45: Para se atingir a dureza superficial especificada no projeto, deverá ser utilizado material com percentual médio de carbono. O impacto da utilização de material com % mais alto de carbono deverá

ser investigado para não ter uma diminuição muito significativa na vida útil das ferramentas de martelamento.

- Matéria- Prima – Utilização de ligas sem o sufixo H: Visando redução de custo, verificar viabilidade de utilizar material SAE 4130 ao invés de SAE 4130H.

- Definição da profundidade de têmpera (total x parcial): No caso de definição pela profundidade com camada total, o processo de manufatura pode ser facilitado, uma vez que não requer maiores controles de resfriamento de têmpera. No entanto, para se obter a camada total, alguns elementos de liga, tais como Boro e Manganês, sejam necessários para aumentar a temperabilidade.

- Definição do perfil de têmpera ao longo do eixo (todo comprimento x somente nas extremidades): Aqui também há vantagens e desvantagens. Se o eixo é temperado ao longo de todo o comprimento tem-se maior tempo de operação e um ferramental (indutor) mais complexo em função das diferenças de diâmetro na região central e extremidades. No entanto, realizando a têmpera por indução somente nas extremidades do eixo pode-se ter o problema conhecido como “Twist”, onde no teste de torção estática o eixo torce na região central ao invés de romper nas extremidades. A figura 6.1 apresenta um eixo com problema de “twist”.



Figura 6.1 Eixo monobloco tubular com problema de “Twist” no teste de torção estática. Este problema ocorre uma vez que o eixo é somente temperado por indução nas extremidades e por isto a região central apresenta menor resistência. (GKN Alemanha)

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - **ASTM E10-01** – Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, 1997

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - **ASTM E92-82** – Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, 1997

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - **ASTM A370-97a** – Standard Test Method and definitions for Mechanical Testing of Steel Products-Tension Test, 1997

BATRA,R.C. **Simulation of brittle and ductile fracture in an impact loaded prenotched plate** , International Journal of Fracture 126 p. 179 , 2004.

BULLENS,D.K – **Steel and its Heat Treatment** - Vol.1 – John Wiley & Sons Inc.– p 97,1938.

CETLIN,P.R **Análise de Fraturas** – Associação Brasileira de Metais – p. 134 e 135, 1988.

CHIAVERINI,V. **Aços e Ferros Fundidos**, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais p. 124 e 203-209, 1990.

COLLA,D. **An Investigation into the preforming of tubes**, International Journal Mech. Sci. Vol.39 No. 5 p. 507 , 1997.

DAVOLI, P. **Independence of the torsional fatigue limit upon a mean shear stress** – International Journal of Fatigue 25 – p 471 – 2003.

FUKIZAWA, K **Materia Jpn.**, – p 17 – 2000.

GENWAY,R **Dynamic Absorbers – Principles & Application** – p 37 – 1996.

GROSMAN, F. **Metal flow in the deformation Gap at primary swaging** – Journal of Materials processing Technology 56 – p 405 – 1996.

HANSEN, P.J. **Fatigue in cold forging dies: tool life analysis** – Journal of Materials Processing Technology 95 – p 40 – 1999.

HARRIS, F.E **The Mechanism of Carburization** – Metals Handbook – ASM, p 679, 1948.

HEBDZYNSKI, R. **Forging on four-lever arms swaging machines** – Journal of Materials Processing Technology 64 – p 205 – 1997.

HIRSCH, T **Origin, Measurement and Effects of the Residual Stresses in Metallic Materials** –Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik, Bremen , Germany – Chapter 6,1999.

- IMANINEJAD, M. **Influence of end-conditions during tube hydroforming of aluminum extrusions**, International Journal Mech. Sciences 46 p. 1195, 2004.
- JAHAZI, M. **The influence of hot rolling parameters on the microstructure and mechanical properties of an ultra-high strength steel** – Journal of Materials Processing Technology 103 – p 276 – 2000.
- KIM, K.S. **Estimation methods for fatigue properties of steels under axial and torsional loading** – International Journal of Fatigue 24 – p 783 – 2002.
- KRAUSS, G **Principles of Heat Treatment** – American Society for Metals – p 50 – 1985.
- KRAUSS, G **Microstructure and Performance of Carburized Steel** – Heat Treating Progress – Part I – 1995
- LAZZAROTTO, L. **A selection methodology for lubricating oils in cold metal forming processes** – Wear 215 – p 1 – 1998.
- LUGSCHEIDER, E. **Development of Superlattice (Ti, Hf, Cr)N coating for cold metal forming applications**– Surface and Coating Technology 177-178 – p 616 – 2004.
- METALS HANDBOOK-ASM - **Forming** Volume 4 — 8th Edition – Rotary Swaging of Bars and Tubes – p 333 –346,1978
- NÄGELE, H. **Automotive parts produced by optimizing the process flow forming - machining** – Journal of Materials Processing Technology 98 – p 171 – 2000.
- NASTRAN, M. **Some comments on cold forming process stability analysis** – Journal of Materials Processing Technology 133 – p 166 – 2003.
- PROVENZA, F. **Projctista de Máquinas**, 2º Prefácio – p.3.03, 3.16, 3.18 e 3.19, 1990.
- RAJAN, K.M. **Effect of heat treatment perform on the mechanical properties of flow formed AISI 4130 steel tubes – a theoretical and experimental assessment** Journal of Materials Processing Technology 125 126 – p 510 – 2002.
- SENUMA, T **Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel Sheets** – ISIJ International, Vol. 41 – p 520-532 – 2001.
- SHIJIAN, Y. **The precision forming of pin parts by cold drawing and rotary forging** – Journal of Materials Processing Technology 86 – p 255 – 1999.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS **.SAE HANDBOOK**: Volume 1 Material – Chemical Compositions of SAE alloy Steels – SAE J404 FEB 91. Pág.1.13 e 1.14, 1993.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS **.SAE HANDBOOK**: Volume 1 Material – Hardenabilty Bands Carbon and alloy H steels – SAE J1268 FEB 88. Pág. 1.65 e Fig. 27, 1993.
- VAZQUEZ, V. **Tool life in cold forging – an example of design improvement to increase service life** – Journal of Materials Processing Technology 98 – p 90 – 2000.